

**Untersuchungen zur Bestimmung der Farbdichte
druckfrischer Offsetfarben
mit einem Druckinspektionssystem**

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Kai Pawlowski

aus Detmold

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
1. Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Tran Quoc Khanh

Tag der Einreichung: 01.11.2010
Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2010

Darmstadt 2010

Kurzfassung

Eine der Entwicklungstendenzen von Bogenoffsetdruckmaschinen ist ein zunehmender Automatisierungsgrad des Druckprozesses. Gleichzeitiges Ziel ist es die Produktion von Makulatur zu reduzieren sowie die Druckqualität zu sichern.

Eine zentrale Lösung hierbei ist die Überwachung und Regelung der aufgetragenen Schichtdicke der lasierenden Druckfarbe. Da die Schichtdicke einer Druckfarbe im Offsetdruck mit ca. $1\mu\text{m}$ sehr aufwändig zu messen ist, hat sich das streng normierte indirekte optische Messverfahren der Densitometrie zur Bestimmung der Farbdichte als Korrelat der Schichtdicke etabliert. Herkömmlich wird die Farbdichte außerhalb der Druckmaschine stichprobenartig am fertigen Druck gemessen. Aus dieser Messung wird die Stellgröße für die Regelung des Farbauftrages abgeleitet. Durch diese Art der Messung ist kein geschlossener Regelkreis für den Farbauftrag möglich. Densitometrische Messungen *in* der Druckmaschine sind aufgrund der hohen Produktionsgeschwindigkeiten kompliziert, kostenintensiv und konnten sich im Markt nicht durchsetzen.

In dieser Arbeit wird die Grundlage für einen neuen Ansatz zur Realisierung der Messung der Farbdichte in der Druckmaschine über ein Druckinspektionssystem geschaffen. Ein Druckinspektionssystem nimmt in der Druckmaschine von jedem Druck ein Bild auf. Dazu wird in dieser Arbeit gezeigt, dass es ohne das Setup des Druckinspektionssystems (spektrale Eigenschaften von Beleuchtung oder Kamerafiltern) zu ändern möglich ist, aus den RGB-Daten der Bildaufnahme eine gerätespezifische Farbdichte zu bestimmen. Weiter wurde ein Ansatz erarbeitet, mit dem eine Transformation dieser gerätespezifischen Farbdichte in eine der unter normierten Bedingungen gemessenen Farbdichte äquivalente Farbdichte möglich ist. Um mit dem Druckinspektionssystem ein rückführbar und präzises Ergebnis der normäquivalenten Farbdichte berechnen zu können, wurde basierend auf den Transforma-

tionsuntersuchungen eine Methode entwickelt, die eine exakte Kalibrierung auf eine Referenz ermöglicht.

Eine Messung der Farbdichte *in* der Druckmaschine hat immer die Eigenschaft, dass nicht getrocknete Druckfarben gemessen werden. Bekannt ist, dass sich der Messwert der Farbdichte während der Trocknung ändert. Welche Effekte des Trocknungsprozesses in welcher Größenordnung dabei den Messwert der Farbdichte beeinflussen, ist jedoch nicht bekannt gewesen. Weiter ist nicht bekannt gewesen, inwieweit die sehr kurzen Trocknungszeiten (kleiner eine Sekunde) zum Messzeitpunkt *in* der Druckmaschine einen Einfluss auf die Messwertänderung der Farbdichte haben. Um eine zuverlässige Messung der Farbdichte in einer Druckmaschine realisieren zu können, ist somit eine genaue Kenntnis der Änderung der Farbdichte während der Trocknungszeit unabdingbar.

Aus diesem Grund ist im Rahmen dieser Arbeit auf Basis eines Druckinspektionssystems ein Versuchsstand entwickelt worden, der eine Messung der Farbdichte während der Trocknungszeit ermöglicht. Dabei wird die Druckfarbe unter den Bedingungen des Offsetdrucks verdruckt. Aus umfangreichen Messungen wurde ein empirisches Modell abgeleitet, welches die Änderung der Farbdichte während der Trocknungszeit beschreibt. Dabei wurden Effekte des Trocknungsprozesses über Zeitkonstanten separiert und die Einflussgröße jedes Effektes auf die Gesamtänderung der Farbdichte bestimmt. Zudem wurde die Änderung der Farbdichte in Abhängigkeit von verschiedenen Bedruckstoffen und Druckfarben anhand des eingeführten Modells gezeigt.

Summary

In the development of lithographic presses a popular aim is to increase the degree of automation. At the same time, paper waste has to be reduced while keeping the print quality high.

These aims could be achieved by monitoring and controlling the applied ink layer thickness. It is a critical task to measure ink layer thicknesses of about $1\text{ }\mu\text{m}$ and the measurement set-ups are usually very complex. Therefore, ink density is a common quantity for controlling the layer thickness of semi-transparent CMYK inks. Typical measurement devices are densitometers that measure the CMYK ink absorption utilizing standardized narrow band filters. Usually, ink density is measured offline, i.e. outside the press. The ink layer thickness is directly controlled by the results of those measurements. Unfortunately, it is very difficult to implement an automatic control system of the press using offline measurements. For this an inline measurement is advantageous, where ink density is measured inside the press for every printed sheet. To implement an automatic control of ink density, inline densitometers are used. Such devices are cost intensive and complex and therefore score a poor market share for sheet fed presses.

This thesis lays the foundation for a new and cost effective method for inline measurement. For that the measurement of the ink density is integrated into a print inspection system. Print inspection systems are usually camera based. They capture and compare images of each printed sheet in order to detect defects. This thesis introduces a method to derive a device specific ink density from the RGB-data without modifying the setup of the inspection system. In addition a solution is developed, that transforms this device specific ink density into a norm equivalent value.

Generally, when measuring inline, the ink has not dried, yet. During the drying process, the value of the ink density develops. Neither the influencing effects of the drying process nor

the magnitude of those effects to the development have been investigated, yet. Especially the short term development (less than one second) needs to be considered for an automatic control system. Therefore, a test rig was developed for measuring the ink density during drying. In this test rig, the ink is printed by standard conditions of the lithographic printing process. From the results of the experiments, an empirical model could be derived. This model describes the development of the ink density during drying. Influencing effects could be separated by their time constants. Furthermore, the development of the ink density varies with substrates and inks. This correlation can also be shown by the model.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. E. Dörsam am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt entstanden.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Dörsam für die lehrreiche und interessante Zeit, die gewinnbringenden Diskussionen und Anregungen sowie die fürsorgliche Unterstützung meiner Arbeit.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. T. Q. Khanh, Leiter des Fachgebietes Lichttechnik der TU Darmstadt, für die Übernahme des Koreferates.

Zudem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Institutes für Druckmaschinen und Druckverfahren, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanken. Insbesondere danke ich Frau Dipl.-Ing. Kathrin Happel sowie Herrn Dr. Philipp Urban für die vielen fachlichen Impulse und Ideen zu meiner Arbeit. Herrn Eric Schunda, Herrn Thorsten Euler und Herrn Norbert Vetter danke ich für die wertvolle Unterstützung in der Umsetzung der zahlreichen Versuchsreihen.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. W. Laux und Herrn S. Wienand der ISRA VISION AG für die vielfältigen Anregungen und fachlichen Diskussionen, sowie die technische Unterstützung im Rahmen unserer Projektarbeit.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meiner Frau Jennifer und meinen Kindern bedanken, die den Mut hatten, mir die Arbeit am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren zu ermöglichen und mich durch ihre geduldige Unterstützung maßgeblich für diese Arbeit motiviert haben. Weiter danke ich meinen Eltern für die umfassende Unterstützung meiner Ausbildung sowie der Korrekturarbeit.

Darmstadt, im Oktober 2010
Kai Pawlowski

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ausgangssituation und Ziel	3
2.1	Druckprozess im Offset.....	3
2.1.1	Grundlagen Offsetdruck	3
2.1.2	Bedruckstoffe	5
2.1.3	Druckfarben	6
2.2	Druckinspektionssysteme	9
2.2.1	Kameras in Druckinspektionssystemen	9
2.2.2	Beleuchtung der Detektionsfläche	10
2.2.3	Das verwendete Druckinspektionssystem.....	11
2.3	Farbdichte.....	14
2.3.1	Die Farbdichte als Regelgröße in der Druckmaschine	14
2.3.2	Definition der Farbdichte.....	16
2.3.3	Farbdichtemessung nach DIN 16536	18
2.3.4	Geräte zur Farbdichtemessung	22
2.3.5	Änderung der Farbdichte durch Trocknung	27
2.4	Stand der Wissenschaft	27
2.5	Ziel der Arbeit und Vorgehensweise	29
3	Messung einer normäquivalenten Farbdichte	31
3.1	Messwertaufnahme und Eignung der Kamera.....	31
3.1.1	Das Messfeld	31
3.1.2	Definition und Berechnung der Farbdichte D^*_{DIS}	33
3.1.3	Linearität der Kamera.....	34
3.2	Gegenüberstellung der Bedingungen in der Messwertaufnahme	37
3.2.1	Spektrale Eigenschaften der Baugruppen.....	37
3.2.2	Messgeometrie und Polarisationsrichtung.....	43
3.2.3	Messunterlage	46
3.2.4	Messfeldgröße.....	47
3.3	Quantitativer Einfluss auf die Farbdichte D^*_{DIS}	47
3.3.1	Filter und Beleuchtung	48
3.3.2	Polarisationsrichtung	50
3.3.3	Messunterlage	62

3.4	Transformationsfunktion der Farbdichte D^*_{DIS}	64
3.5	Zusammenfassende Betrachtung.....	68
4	Kalibrierung des Druckinspektionssystems.....	69
4.1	Grundlagen der Kalibrierung	69
4.2	Kalibriervorschrift.....	71
4.3	Das Bezugsnormal: Der Kalibrierbogen	73
4.4	Versuchsaufbau zur Kalibrierung	74
4.4.1	Referenzmessgerät.....	75
4.4.2	Messung mittels Druckinspektionssystems	80
4.5	Messmittelfähigkeit der Messverfahren	81
4.6	Streulicht und Oberflächenreflexion	85
4.7	Approximation der Kalibrierfunktion	88
4.7.1	Ansatz über die Transformationsfunktion	88
4.7.2	Empirischer Ansatz	89
4.8	Kalibrierfunktionen.....	90
4.8.1	Kalibrierfunktion abhängig von der Druckfarbe.....	90
4.8.2	Kalibrierfunktion abhängig vom Bedruckstoff	92
4.8.3	Approximieren der Kalibrierfunktion	95
4.9	Zusammenfassung und Fazit.....	99
5	Farbdichtemessung druckfrischer Farben.....	101
5.1	Ergebnis normgerechter Messungen	101
5.2	Trocknungszeiten bis zum Messzeitpunkt	103
5.3	Methode zur Untersuchung der Farbdichte während der Trocknung	105
5.4	Aufbau Versuchsstand.....	107
5.5	Grundlegende Untersuchungen.....	109
5.5.1	Allgemeines Ergebnis der Messwertänderung der Farbdichte während der Trocknung	110
5.5.2	Interpretation des Messverlaufs	111
5.5.3	Nachweis der Deutung der Messwertzunahme	116
5.5.4	Fähigkeit der Messungen im Kurzzeitbereich	117
5.5.5	Einfluss der Schichtdicke auf Kurzzeitmessung	121
5.6	Modellbildung zur quantitativen Auswertung	122

5.6.1	Bewertung existierender Teilmodelle.....	122
5.6.2	Entwicklung des empirischen Modells	124
5.6.3	Bestimmung von geeigneten Startwerten.....	126
5.6.4	Gewichtungsfunktion für Approximation	129
5.6.5	Approximationsmethode	130
5.7	Zusammenfassung und Fazit	130
6	Farbdichteänderung durch Trocknung	131
6.1	Versuchs- und Modellierungsbedingungen	131
6.2	Einfluss der Schichtdicke	132
6.2.1	Kurzzeiteffekt: Oberflächenänderung rau \Rightarrow glatt....	133
6.2.2	Mittelzeiteffekt: Oberflächenänderung glatt \Rightarrow rau..	135
6.2.3	Langzeiteffekt: Pigmenttransport.....	138
6.2.4	Zusammenfassende Betrachtung	140
6.3	Einfluss des Bedruckstoffes.....	142
6.3.1	Bedruckstoffeigenschaften.....	142
6.3.2	Die Wirkung auf die Farbdichteänderung	143
6.3.3	Kurzzeiteffekt	147
6.3.4	Mittelzeiteffekt	150
6.3.5	Langzeiteffekt.....	151
6.3.6	Zusammenfassende Betrachtung	153
6.4	Einfluss der Druckfarbe	153
6.5	Zusammenfassung und Fazit	155
7	Zusammenfassung und Ausblick	157
8	Literaturverzeichnis.....	159

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Erläuterung
A	m ²	Fläche
A'	mm	Höhe der Messblende in Y-Richtung
A''	mm	Abstand Messblende relativ zum Volltonfeld
bzw.		beziehungsweise
B	mm	Abstand Messblende relativ zum Volltonfeld
B'	mm	Breite des Messfeldes in X-Richtung
B''	mm	Breite der Messblende in X-Richtung
β		Reflexionsgrad
β_D		Mit Eingangsspektrum und Filterspektrum gewichteter Reflexionsgrad
β^*_{DIS}		Reflexionsgrad aus RGB-Werten DIS
C		Druckfarbe Cyan
D		Farbdichte normgerecht nach DIN 16536
D_{NP}		Farbdichte normgerecht nach DIN 16536 ohne Polfilter
D^*_{DIS}		Farbdichte aus DIS-Messungen
$D^*_{DIS^*}$		Simulierte Farbdichte von DIS-Messungen
$D^*_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$		Normäquivalente Farbdichte
$D^*_{DIS,dry}$		Farbdichte aus DIS-Messung für getrocknete Druckfarbe
$\Delta D^*_{DIS,i}$		Betrag der Änderung der Farbdichte D^*_{DIS} durch den Effekt i
ΔD		Betrag der Änderung der Farbdichte normgerecht

δ		Korrekturwert Transformation
DIS		Druckinspektionssystem
E	mm	Abstand Bedruckstoffkante zum Volltonfeld in X-Richtung
ε	°	Einfallswinkel
F	mm	Abstand Bedruckstoffkante zum Volltonfeld in Y-Richtung
i		laufender Index
K		Schwarz (Black, Key)
K_s		Absorptionskoeffizient
λ	nm	Wellenlänge
M		Druckfarbe Magenta
MES		Mean Square Error
Φ_{rel}		relative Strahlungsleistung
Ψ_C		Korrekturwert Volltonfeld
Ψ_W		Korrekturwert Bedruckstoffreferenz
R	l/cm	Rasterfrequenz
RMSE		Root Mean Square Error
ρ_{\perp}		Oberflächenreflexion senkrecht zur Einfallsebene polarisiert
ρ_{\parallel}		Oberflächenreflexion parallel zu Einfallsebene polarisiert
ρ		Oberflächenreflexion
S_{NIP}	mm	Strecke zwischen Nip und Detektionsstelle
$\sigma(x)$		Standardabweichung von x
$2 \sigma(x)$		zweifache Standardabweichung von x
$\sigma^2(x)$		Varianz von x
S		Streuungskoeffizient

SNR		Signal/Rauschverhältnis
θ		Zeitkonstante s
t	s	Zeit
t_D	s	Trocknungszeit für Farbdichte D
t_{D^*DIS}	s	Trocknungszeit für Farbdichte D^*_{DIS}
t_{NIP}	s	Zeit während der S_{NIP} zurückgelegt wird
t_{trans}	s	Transportzeit der Bogen zwischen Druckwerken
τ		Transmissionsgrad
Θ_i	s	Zeitkonstante des i-ten Effektes
$u(x)$		Unsicherheit von x
vgl.		vergleiche
Y		Druckfarbe Gelb (Yellow)

1 Einleitung

Aufgrund des hochwertigen Druckergebnisses und einer hohen Flexibilität bei relativ geringem Vorstufen- und Rüstaufwand sowie der damit verbundenen geringen Kosten, hat das Offsetdruckverfahren einen enormen Marktanteil erobert [72]. Dabei nimmt der Bogenoffset eine bedeutende Rolle im Akzidenzdruck ein. Aktuelle Bogenoffsetdruckmaschinen sind Hochleistungsmaschinen mit einer maximalen Produktionsleistung zwischen 16500 und 18000 Bogen/Stunde [58, 84].

Qualitätsmerkmale wie das Erreichen einer vorgegebenen Farbdichte oder eines Farbortes werden nach Druckerstellung offline per Stichprobe kontrolliert [9]. Dazu werden normierte Densitometer und Spektralphotometer verwendet [29, 34-37, 40, 54, 55, 57]. Anhand der Ergebnisse dieser Stichproben können fargebende Parameter, wie beispielsweise die Schichtdicke der Druckfarbe an der Druckmaschine verstellt und geregelt werden [43, 74].

Das Maß der relativen Farbdichte wird im Vierfarbdruck als Korrelat für die Schichtdicke verwendet. Damit dient die Farbdichte als indirekte Messgröße für die Schichtdicke einer gedruckten, lasierenden Druckfarbe. Als Messgerät wird ein nach DIN 16536-2 genormtes Densitometer eingesetzt [36]. Die relative Farbdichte der Druckfarben wird außerhalb der Druckmaschine (offline) auf einem Druckkontrollstreifen gemessen und aus dem Ergebnis das Maß der Stellgröße für das Farbwerk abgeleitet [74]. Durch diese Methode ist es nicht möglich einen geschlossenen („closed-loop“) Regelkreis für gedruckte Schichtdicken zu realisieren. Soll der Regelkreis geschlossen werden, ist es notwendig die relative Farbdichte während der Produktion für jeden einzelnen Druckbogen einer Auflage in der Druckmaschine (inline) zu messen. Um dies zu realisieren, sind Inline-Densitometer entwickelt worden, die herkömmlich als Peripheriegerät an der Druckmaschine installiert werden [53, 129].

Ein innovativer Ansatz zur Realisierung einer Inline-Messung der Farbdichte ist es, das Ausgangssignal eines Druckinspektionssystems (DIS) zu nutzen.

Diese Lösung zur Messung der Farbdichte hat jedoch Nachteile:

- Eingangsspektrum und Geometrie der Messwerterfassung durch ein Druckinspektionssystem sind grundverschieden zu den normativen Vorgaben.
- Die Filter der eingesetzten RGB-Kameras sind für eine optimale visuelle Wiedergabe angepasst und entsprechen somit nicht der Charakteristik eines Densitometers.
- Aufgrund der benötigten Lichtmenge und der komplizierten Einbausituation in einer Druckmaschine muss ebenfalls auf die nach DIN 16536 vorgeschriebene Polfiltereinrichtung verzichtet werden.

Des Weiteren sind gedruckte Farben zum Messzeitpunkt einer Inline-Messung noch nicht getrocknet. Als Qualitätskriterium für das Erscheinungsbild des Druckes wird jedoch der getrocknete Zustand herangezogen. Da eine Änderung der relativen Farbdichte während der Trocknungsvorgänge zu erwarten ist, ist ein Verständnis dieser Messwertänderung notwendig.

Das Ziel dieser Arbeit ist es zum einen, eine Lösung zu zeigen, mit der normäquivalente Ergebnisse einer Messung der relativen Farbdichte durch ein im Setup unverändertes Druckinspektionssystem möglich sind. Zum anderen soll ein Modell entwickelt werden, welches die Änderung der relativen Farbdichte während der Trocknungszeit beschreibt.

2 Ausgangssituation und Ziel

In diesem Kapitel werden zunächst grundlegende Eigenschaften des Offsetdruckprozesses dargestellt. Im Anschluss wird die Funktionsweise von Druckinspektionssystemen (DIS) im Allgemeinen und die Eigenschaften des in dieser Arbeit verwendeten Druckinspektionssystems im Speziellen erläutert. Weiter folgt eine allgemeine Einführung und Definition der Farbdichte D sowie eine Vorstellung etablierter Messverfahren und ihrer praktischen Umsetzung. In den beiden letzten Abschnitten werden zum einen der wissenschaftliche Standpunkt zum Forschungsfeld Farbdichte und zum anderen die Ziele und Vorgehensweisen dieser Arbeit dargestellt.

2.1 Druckprozess im Offset

Zusammen mit dem Tief-, Flexo- und Siebdruckverfahren ist der Offsetdruck eines der konventionellen Druckverfahren [41, 43]. Im folgenden Abschnitt wird zunächst das grundlegende Prinzip dieses Druckverfahrens erläutert. Im Anschluss werden die für den Offsetdruck üblichen Bedruckstoffe, im Allgemeinen Papier, kurz vorgestellt. Weiter werden Aufbau und Eigenschaften konventioneller Druckfarben des Offsetdrucks dargestellt.

2.1.1 Grundlagen Offsetdruck

Der Offsetdruck ist ein indirektes Flachdruckverfahren. Indirekt bedeutet, dass die Druckfarbe der Druckform (auch Druckplatte genannt) mittels eines Zwischenträgers, dem sogenannten Gummituch (auch Drucktuch genannt [16]), übertragen wird [44, 74, 103, 115, 116]. Unter einem Flachdruckverfahren wird die Eigenschaft verstanden, dass bildgebende und nicht bildgebende Stellen in einer Ebene liegen. Es gibt damit im Druckbild nur zwei Zustände: farbübertragende und nicht farbübertragende Stellen. Demnach kann die übertra-

gende Farbmenge bzw. Farbschichtdicke durch die in Abbildung 1 gezeigte Druckform nicht variiert werden.



Abbildung 1: Foto einer Druckform für den Offsetdruck. Die bildgebenden Stellen entsprechen den dunklen Bereichen.

Um eine Trennung zwischen bild- und nicht bildgebenden Stellen zu realisieren, werden oberflächenenergetische Eigenschaften genutzt. Die bildgebenden Stellen (dunkle Bereiche in Abbildung 1) sind hydrophob bzw. lipophil, nicht bildgebende Stellen sind hydrophil bzw. lipophob. Wird die Druckform wie in Abbildung 2 dargestellt durch ein Feuchtwerk vollflächig befeuchtet und anschließend vollflächig mit Druckfarbe eingefärbt, wird nur an den lipophilen Stellen Druckfarbe angenommen.

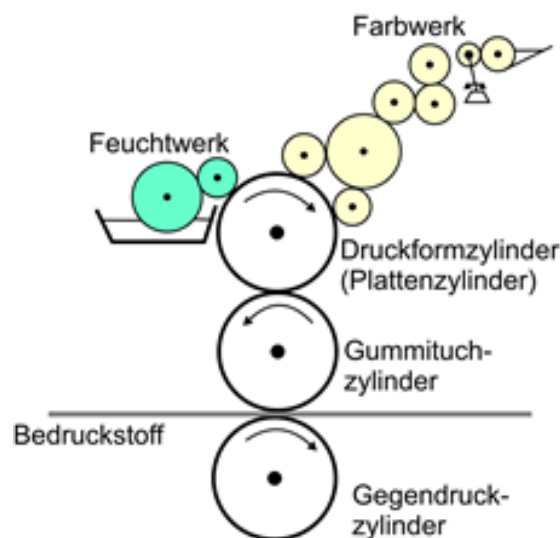


Abbildung 2: Baugruppen eines Offsetdruckwerkes: Farbwerk, Feuchtwerk, Druckform-, Gummituch- und Gegendruckzylinder [64].

Bevor die Druckfarbe auf die Druckform aufgetragen wird, wird sie im Farbwerk mehrfach geschert und zwischen den einzelnen Walzen gespalten. Dies ist notwendig, um die erforderliche Farbschichtdicke von ca. $2\mu\text{m}$ auf die Druckform dosieren und konstant über die Druckbreite einstellen zu können. Die Gesamtmenge der Druckfarbe, die den Walzen zugeführt wird, wird durch die Farbschieber am Farbkasten bestimmt. Alternativ wird anstatt der Farbschieber ein Farbmesser mit Zonenschrauben eingesetzt. Somit kann die übertragende Schichtdicke entsprechend der Farbzonbreite in Druckbreite profiliert werden. Eine Profilierung der Farbschichtdicke in Drucklänge ist hingegen nicht möglich¹. Die übertragende Schichtdicke der Druckfarbe beträgt zwischen $0,5\text{-}1,5\mu\text{m}$.

Im Jahr 2001 wurde der Prozessstandard Offsetdruck (PSO) eingeführt [18]. In diesem Standard sind Konzepte der Prozessabläufe in Druckvorstufe und Druckproduktion beschrieben. Dieser Standard soll dazu führen, dass in verschiedenen Druckereien unter vergleichbaren Bedingungen gedruckt wird. Das bedeutet, dass dort Bedruckstoffklassen, Zielwerte für Farbart und Farbdichte der Druckfarben, Messverfahren und Toleranzen beschrieben sind.

2.1.2 Bedruckstoffe

Im Bogenoffsetdruck werden in der Regel gestrichene- und ungestrichene Papiere als Bedruckstoff verwendet. Im Allgemeinen ist Papier ein flächiger verfilzter natürlicher Faserverbund [15]. Um die Bedruckbarkeit und damit das optische Ergebnis des Druckes zu optimieren, werden Papiere weiter behandelt. Das beinhaltet das Einbringen von Füllstoffen in die Papiermatrix, Verfahren zur Oberflächenglättung und die Veredelung der Papieroberfläche durch Striche. Dadurch können

¹ Es tritt im Allgemeinen eine Schichtdickenabnahme über der Bogenlänge auf. Um dies zu kompensieren, sind technische Lösungen erarbeitet worden, die auch eine Beeinflussung der Farbschichtdicke ermöglichen. Dies ist jedoch keine Standardeinrichtung einer Offsetdruckmaschine.

für die Bedruckbarkeit maßgebende Faktoren wie Glätte, Saugfähigkeit und Porosität des Papiers beeinflusst werden.

Der Prozessstandard Offsetdruck definiert fünf Bedruckstoffklassen [18]. Zu unterscheiden sind:

- (1) Glänzend gestrichenes Bilderdruckpapier
- (2) Matt gestrichenes Bilderdruckpapier
- (3) Glänzendes Rollenoffsetdruckpapier (LWC)
- (4) Ungestrichenes Papier (Naturpapier)
- (5) Ungestrichenes gelbliches Papier

Im Bogenoffsetdruck sind dabei Papiere der Klassen 3 und 5 auf Grund ihrer optischen und mechanischen Eigenschaften eher unüblich. Glänzend gestrichene Papiere besitzen eine gestrichene glatte Oberfläche, in die Farbpigmente nicht leicht eindringen können. Matt gestrichene Papiere sind ebenfalls mit einem Strich versehen, der ein Eindringen der Farbpigmente reduziert. Im Vergleich zu den glänzend gestrichenen Papieren der 1. Klasse sind sie jedoch deutlich rauer. Ungestrichene Papiere besitzen keine Beschichtungen, die ein Eindringen der Farbpigmente verhindern. Die Oberfläche ist im Vergleich zu Klasse 1 und 2 noch rauer.

2.1.3 Druckfarben

Farben für den Offsetdruck sind im Wesentlichen aus den Bestandteilen Pigmente, Öle bzw. Harze, Lösemittel und Additiven zusammengesetzt [51, 80, 83]. Dabei sind lediglich die Pigmente der Druckfarbe aktiv an der Farbgebung beteiligt. Im Allgemeinen handelt es sich um Absorptionspigmente, die das Eingangsspektrum selektiv absorbieren. Die farbgebenden Pigmente sind in einer Basis aus Harzen und Additiven dispergiert. Der chemische Aufbau und die Zusammensetzung der Basis beeinflussen maßgeblich die Verdruckbarkeit der Farbe. Das beinhaltet zum einen Eigenschaften wie die Viskosität η und die Oberflächenspannung γ , zum anderen Trocknungsmechanismen und Abriebfestigkeit [51, 101].

Die wesentlichen Trocknungsmechanismen von Offsetdruckfarbe sind Wegschlagen und eine Filmbildung durch Oxidation [52]. Beim Wegschlagen penetriert der viskose Bestandteil der Druckfarbe in den porösen Bedruckstoff. Die Dauer dieses Vorganges ist abhängig von den rheologischen Eigenschaften der Druckfarbe sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Papiers und kann mehrere Stunden andauern [82]. Die oxidative Trocknung geschieht durch eine radikalische Reaktion. Durch den Luftsauerstoff werden Molekülketten der Öle bzw. Harze ähnlich eines Polymerisationsvorganges miteinander verbunden und es entsteht ein verfestigter Farbfilm. Ebenfalls entstehen bei diesem Vorgang Aldehyde oder Alkohole als Spaltprodukt, die durch den Bedruckstoff diffundieren. Trotz des Einsatzes von Katalysatoren dauert dieser Vorgang bis zu mehreren Tagen und eignet sich nicht als hauptsächlicher Trocknungseffekt [52, 83].

Farbige Reproduktionen werden im Allgemeinen als Vierfarbdruck aus den Druckfarben Cyan (C), Magenta (M), Gelb (Y)² und Schwarz (K)³ erstellt. Um aus diesen vier Farben Halbtöne zu erzeugen, werden sie in einem Raster gedruckt. Durch das Auslösungsvermögen des Auges entsteht für den Betrachter aus den nebeneinander liegenden und unterschiedlich farbigen Rasterpunkten ein additiv gemischter Farbton. Teilweise werden die Druckpunkte auch übereinander gedruckt und es entsteht ein subtraktiv gemischter Farbhalbton. Dies funktioniert allerdings nur unter der Bedingung, dass die Druckfarbe lasierende Eigenschaften besitzt. Lasierend bedeutet, dass die Druckfarbe möglichst wenig streuende Eigenschaften besitzt. Somit kann einfallende Strahlung durch die Farbschicht treten bzw. auf dem Untergrund reflektierte Strahlung wieder durch die Druckfarbe zurück zum Betrachter gelangen. Ideal lasie-

² Allgemein werden die Abkürzungen an die englischen Bezeichnungen der Skalenfarben angelehnt. Die Abkürzung von Gelb durch y stammt somit vom englischen Wort yellow.

³ Schwarz wird nicht durch b (vgl. Englisch black) abgekürzt, sondern durch ein k. k entstammt der Abkürzung für key. Das b wird für die Abkürzung von Blau (blue) verwendet.

rende Druckfarben haben also nur absorbierende und keine streuende Eigenschaften [40, 51]. Die Kombination aus additiver und subtraktiver Farbmischung wird als autotypische Farbmischung bezeichnet.

In Abbildung 3 ist die Wirkungsweise der autotypischen Farbmischung dargestellt. Auf der linken Seite sind die Druckpunkte und auf der rechten Seite die wahrgenommene Farbe des Betrachters in genügend großem Abstand abgebildet. Durch die autotypische Farbmischung entsteht aus den beiden Druckfarben Cyan und Magenta in Kombination mit dem weißen Bedruckstoff ein „Lila“.



Abbildung 3: Gedruckte Rasterpunkte der Druckfarben Magenta und Cyan (linke Hälfte). Aus dem Mischungsverhältnis der Reflexionsspektren der Druckpunkte und des Bedruckstoffes wird für den Betrachter ein additiv gemischter Farbton (rechte Hälfte) erzeugt [5].

In Abbildung 4 sind Reflexionsspektren der drei Druckfarben Cyan, Magenta und Gelb einer Schichtdicke im Zielfenster des Prozessstandard Offsetdruck dargestellt. Druckfarben sind lasierend, um die autotypische Farbmischung gerasterter Drucke zu ermöglichen.

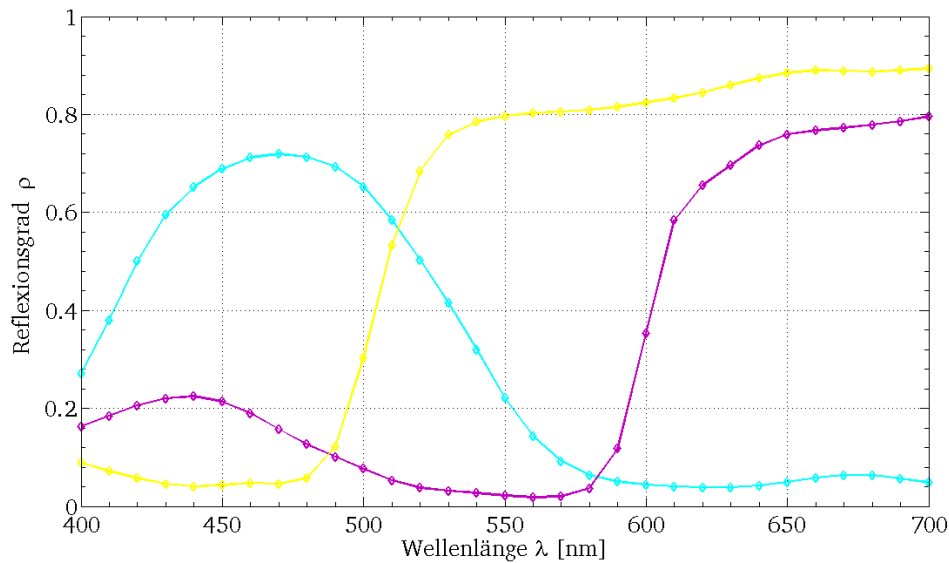


Abbildung 4: Reflexionsspektren der drei Druckfarben Cyan, Magenta und Gelb. Aufgetragen ist der Reflexionsgrad ρ über der Wellenlänge λ . Gemessen wurde mit einer Auflösung in der Wellenlänge von 10nm.

2.2 Druckinspektionssysteme

Druckinspektionssysteme (DIS)⁴ werden eingesetzt, um einerseits die Qualität des Bedruckstoffes, andererseits des Druckbildes, zu kontrollieren und zu protokollieren. Dazu werden Momentan-Bilder (Ist-Zustand), die während des Druckes aufgenommen werden, mit einem fehlerfreien Referenzbild (Soll-Zustand) verglichen [108]. Abweichungen zwischen den Bildern werden zur Druckfehlererkennung ausgewertet [112]. Neben dieser Basisfunktion werden zunehmend weitere Funktionen, wie beispielsweise die Informationsaufnahme für die Registersteuerung oder eine Farbüberwachung, integriert [69, 108].

2.2.1 Kameras in Druckinspektionssystemen

Prinzipiell werden zur Druckinspektion industrielle Kameras eingesetzt. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um Kameras

⁴ DIS für Druckinspektionssystem ist eine Abkürzung, die nicht dem allgemeinen Sprachgebrauch entspricht. Sämtliche Gleichungszeichen mit einem Index DIS beziehen sich auf das Druckinspektionssystem oder auf Daten, die mit dem Druckinspektionssystem aufgezeichnet wurden.

mit RGB-Filtern. Das bedeutet, dass Kameras eingesetzt werden, die je einen Sensor besitzen, dessen spektrale Empfindlichkeit einer der drei Grundfarben Rot (R), Grün (G) und Blau (B) entsprechen. Sie werden häufig auch als Rot-Kanal, Grün-Kanal und Blau-Kanal bezeichnet. Die spektrale Empfindlichkeit jedes Kanals ist an die Wahrnehmungsempfindlichkeit des Menschen angepasst. Nur für Sonderanwendungen werden weitere Kanäle, z.B. im IR-Bereich, ergänzt [113]. Abhängig von zu erreichender Auflösung, Aufnahmegeschwindigkeit, Installationsumgebung und finanziellem Aufwand werden Flächen- oder Zeilenkameras eingesetzt. Generell muss die Belichtung der Kameras mit dem Produktionsrapport synchronisiert werden. Dies geschieht üblicherweise über externe Drehwinkelgeber oder durch Ausnutzen von anderen Maschinensignalen. Um mit Zeilenkameras flächige Bilder aufzunehmen, muss die Belichtung jeder Zeile exakt mit der Produktionsgeschwindigkeit synchronisiert sein. Mit Hilfe eines Rechners wird anschließend Zeile für Zeile zu einem vollständigen Bild aneinandergesetzt. Aufgrund der hohen Produktionsgeschwindigkeiten der Druckmaschinen von bis zu 3,5 m/s müssen dabei sehr große Datenmengen bis zu 1GByte/s verarbeitet werden [108]. Die Auswertung der aufgezeichneten Bilder erfolgt in einem Industrie-PC.

2.2.2 Beleuchtung der Detektionsfläche

Damit die eingesetzten Kameras ein Bild aufnehmen können, muss die Detektionsfläche beleuchtet werden. Die Beleuchtung erfolgt entweder durch Blitzgeräte oder kontinuierliche Lichtquellen. Blitzlampen sind in der Regel aus Xenon-Blitzröhren aufgebaut. Für kontinuierliche Beleuchtungen werden über Lichtleiter emittierende Halogenglühlampen, LED-Leuchten und Leuchtstoffröhren eingesetzt. In jeder Umsetzung liegt das Hauptaugenmerk auf möglichst homogener und lichtstarker Ausleuchtung der Detektionsfläche. Es gibt ein breites Band an technischen Umsetzungen, die oft individuell auf die gestellten Anforderungen angepasst sind.

2.2.3 Das verwendete Druckinspektionssystem

Kamera

In dem in dieser Arbeit genutzten Druckinspektionssystem wird die in Abbildung 5 gezeigte RGB-Zeilenkamera XIIMUS des Herstellers TVI zur Bildaufnahme verwendet.



Abbildung 5: Im Druckinspektionssystem verwendete Zeilenkamera TVI XIIMUS. Sie arbeitet nach dem One-Shot Prinzip mit jeweils einem Sensor für die drei Kanäle RGB mit einer Auflösung von 2048 Pixel [100].

Die Kamera ist nach dem in Abbildung 6 dargestellten One-Shot Prinzip aufgebaut.

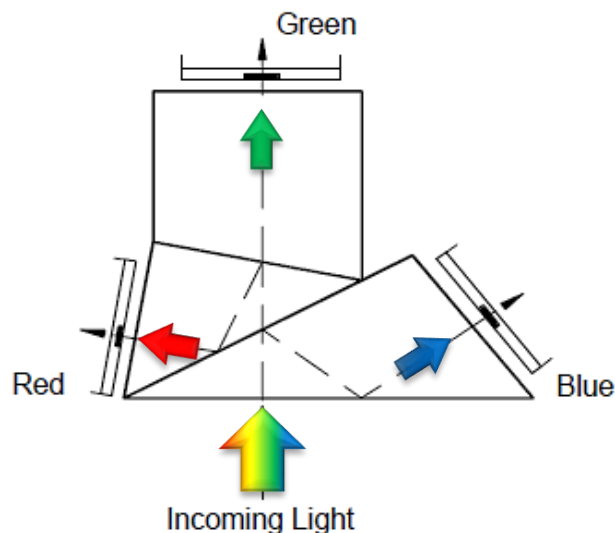


Abbildung 6: One-Shot Prinzip der Zeilenkamera TVI XIIMUS des Druckinspektionssystems. Das einfallende Licht wird über Prismen in drei Richtungen geleitet. Dort kann das einfallende Licht gleichzeitig durch einem dem jeweiligen Kanal entsprechenden Absorptionsfilter detektiert werden [119].

Das bedeutet, dass das einfallende Licht über Prismen auf drei Kanäle aufgeteilt wird. Somit kann für jeden Kanal ein eigener Sensor verwendet werden und damit simultan ein Signal für jeden Kanal aufgenommen werden kann.

Die laterale Auflösung des eindimensionalen Sensors der Kamera beträgt 2048 Pixel. Die spektrale Sensitivität der RGB-Kanäle der Zeilenkamera des Druckinspektionssystems, wird durch die durchgehenden Linien in Abbildung 7 repräsentiert.

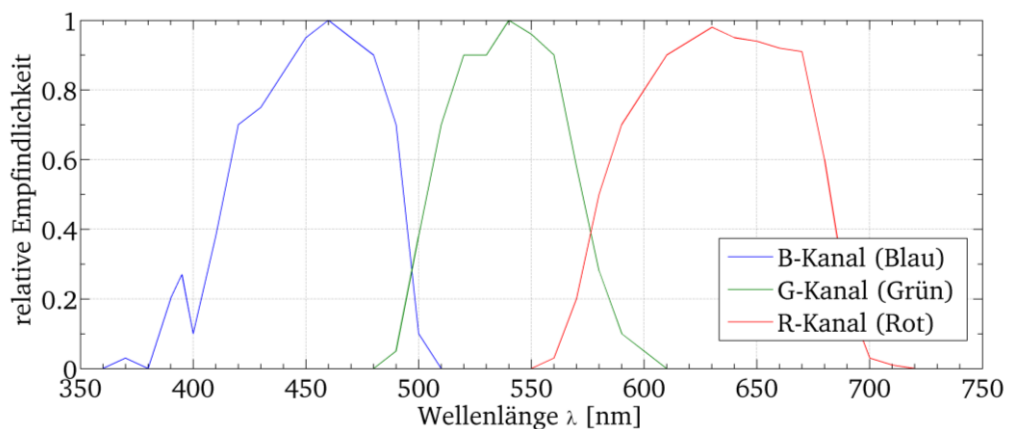


Abbildung 7: Relative Empfindlichkeit der verwendeten Zeilenkamera TVI XIIMUS. Es ist die relative Empfindlichkeit über der Wellenlänge λ aufgetragen [113, 119].

Lage, Form und Breite der Filter sind auf eine möglichst gute und wahrnehmungsgetreue Abbildung optimiert. Das bedeutet, dass die Breite der einzelnen Filter so gewählt ist, dass der gesamte sichtbare Bereich des Spektrums abgedeckt wird. Die Lage des Empfindlichkeitsmaximums entspricht weitestgehend der Lage der Normspektralwertkurven.

Beleuchtung

Im Druckinspektionssystem wird zur Beleuchtung der Detektionsstelle als Leuchtmittel eine Standardleuchtstoffröhre der Firma Osram verwendet. Es handelt sich um einen Typ 840. Das bedeutet, dass das Leuchtmittel einen Farbwiedergabeindex $R_a \geq 80$ bei einer Farbtemperatur von 4000K hat [93]. Bei dem verwendeten Leuchtmittel handelt es sich um eine Niederdruck-Gasentladungslampen. Die Glasröhre der Lampe ist mit fluoreszierenden Leuchtstoffen beschichtet. Sie leuchten

durch eine Erregung im UV-Bereich. Fluoreszierende Beleuchtungen weisen kein kontinuierliches Spektrum auf. Das Emissionsspektrum wird durch die verwendeten Fluoreszenzmaterialien beeinflusst.

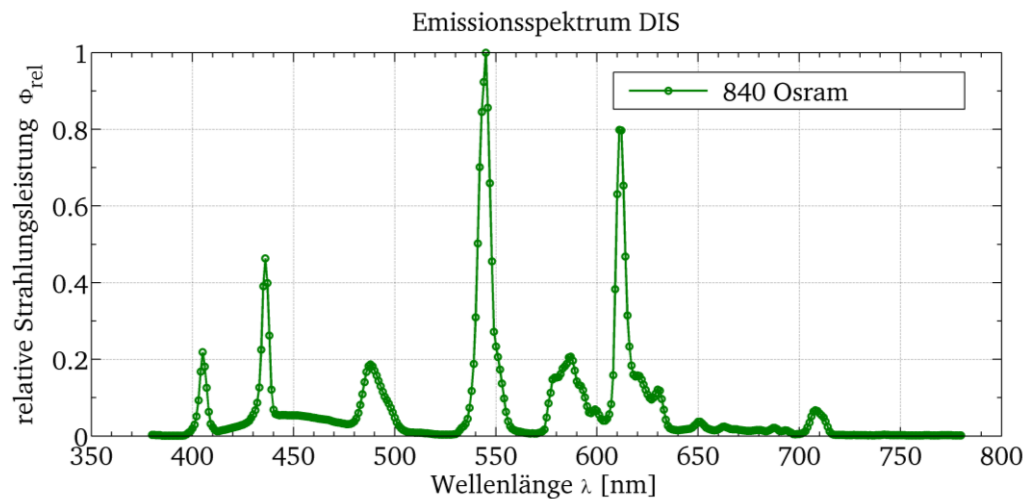


Abbildung 8: Emissionsspektrum der Beleuchtung des Druckinspektionssystems. Aufgetragen ist die relative Strahlungsleistung über der Wellenlänge. Gemessen wurde mit einem Spektroradiometer Konica Minolta CS-1000A und einer Auflösung von 1nm in der Wellenlänge.

Das Emissionsspektrum des Leuchtmittels in Abbildung 8 wurde mit einem Spektroradiometer Konica Minolta CS-1000A gemessen. In Abbildung 8 ist die relative Strahlungsleistung Φ_{rel} über der Wellenlänge λ aufgetragen. In der Auftragung ist die angesprochene diskontinuierliche Verteilung der relativen Strahlungsleistung des Emissionsspektrums zu sehen. Es gibt mehrere Bereiche im Emissionsspektrum, die entweder eine sehr geringe oder sehr hohe relative Strahlungsleistung haben.

Die Abstrahlcharakteristik ist gerichtet diffus. Das bedeutet, dass es eine Vorzugsabstrahlrichtung gibt, in welcher die Abstrahlung jedoch diffus ist. Die Höhe der Leuchte beträgt 8cm. Über diese Breite wird die Detektionsstelle einseitig, das heißt mit einem Leuchtmittel unter- oder oberhalb der Detektionsstelle, beleuchtet.

2.3 Farbdichte

Die Farbdichte wird in der Drucktechnik als Regelgröße für die Auftragsmenge der Druckfarbe in der Druckmaschine verwendet. Im Folgenden soll zunächst die Begründung für die Verwendung dieser Messgröße sowie ihrer Definition und Herleitung dargestellt werden. Im Anschluss werden das zugehörige Messverfahren und die technischen Umsetzungen des Messverfahrens erläutert.

2.3.1 Die Farbdichte als Regelgröße in der Druckmaschine

Die Schichtdicke der gedruckten Farbe ist wegen ihrer lasierenden Eigenschaft maßgeblich für den Farbeindruck. Üblicherweise werden im Offsetdruck Schichtdicken in der Größenordnung von $1\mu\text{m}$ auf einen rauen Bedruckstoff übertragen. Eine derartige geringe Schichtdicke messtechnisch zu erfassen, ist nur mittels in der Produktion praxisunfreundlicher und kostenintensiver Messtechnik realisierbar. Weißlichtinterferometrie (WLI), konfokale Messmethoden oder die Technik eines Atomic Force Microscopes (AFM) kommen beispielsweise als Verfahren infrage. Um dennoch eine messtechnisch erfassbare Größe für die gedruckte Schichtdicke aufnehmen zu können, wird in der praktischen Anwendung das indirekte Messverfahren der Densitometrie angewandt. Hier wird eine Relation zwischen der Farbdichte der Druckfarbe und der gedruckten Schichtdicke genutzt [57]. Den Zusammenhang zwischen Schichtdicke der gedruckten Druckfarbe und der Farbdichte in Abbildung 9 wurde von TOLLNAR und ERNST für schwarze Druckfarben untersucht [118] und auf alle Absorptionsfarben übertragen [9].

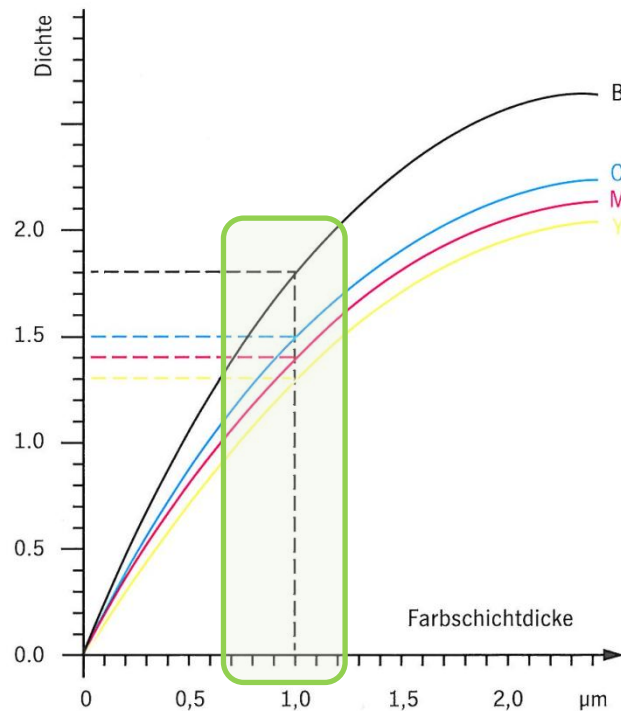


Abbildung 9: Aufgetragen ist die Farbdichte D über der Schichtdicke d der Druckfarbe in μm . Durch den grünen Rahmen wird der technisch relevante Bereich der Schichtdicke d symbolisiert. Weiter ist zu erkennen, dass dieselbe Schichtdicke einer Druckfarbe zu verschiedenen Farbdichten führt [57].

Im technisch relevanten Bereich des Offsetdrucks ist der Zusammenhang zwischen der Schichtdicke d und der Farbdichte quasi linear [57]. Zudem wird deutlich, dass dieselbe Schichtdicke unterschiedlicher Druckfarben zu unterschiedlichen Farbdichten führt. Der Zusammenhang von Farbdichte und Schichtdicke der Druckfarbe ist abhängig von Bedruckstoff und Druckfarbe und muss für die jeweilige Kombination bestimmt werden [9].

2.3.2 Definition der Farbdichte

Grundlage der Definition der Farbdichte D ist das Gesetz nach BEER-LAMBERT. Dieses Gesetz in Gleichung 2.1 beschreibt die Schwächung der Strahlungsintensität I_1/I_0 in einem absorbierenden Material in Abhängigkeit der Wellenlänge λ [27, 39].

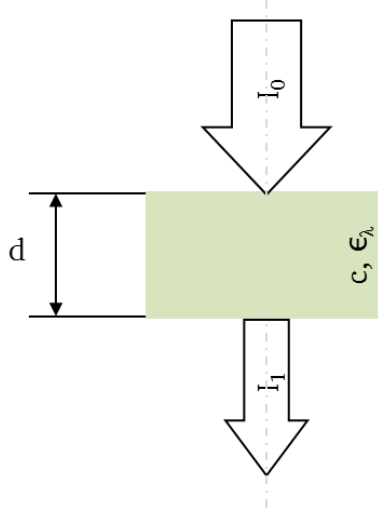


Abbildung 10: Absorption in einem Material. Die einfallende Strahlungsintensität I_0 wird durch Absorption im Material auf die Strahlungsintensität I_1 geschwächt. Die Schwächung ist von d , c und ϵ_λ abhängig.

Die Schwächung der Strahlungsintensität ist dabei von der Schichtdicke d und der Konzentration c und dem Extinktionskoeffizienten ϵ_λ abhängig [97, 102].

$$E_\lambda = \log \left(\frac{I_1}{I_0} \right) = \epsilon_\lambda \cdot c \cdot d \quad 2.1$$

Das Verhältnis aus reflektierter I_1 zu einfallender Strahlungsintensität I_0 wird als Reflexionsgrad β_λ bezeichnet und nach 2.2 berechnet [11, 59, 128]. Dabei ist λ die Wellenlänge, $\rho(\lambda)$ der Reflexionsgrad für monochromatische Strahlung der Wellenlänge λ , S_λ die relative spektrale Eingangsstrahlungsverteilung und $s(\lambda)_{rel}$ die relative spektrale Empfindlichkeit des Empfängers.

$$\beta_\lambda = \frac{I_1}{I_0} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) \cdot S_\lambda \cdot s(\lambda)_{rel} \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \cdot s(\lambda)_{rel} \cdot d\lambda} \quad 2.2$$

Das Gesetz nach BEER-LAMBERT gilt für streuungsfreie idealisierte Lösungen, die ausschließlich absorbierende Eigenschaften besitzen. Diesem Ideal entsprechen Druckfarben nicht. TOLLNAR und ERNST haben jedoch gezeigt, dass dieser Ausdruck in Grenzen auch für Druckfarben gilt. Zudem wird in der Drucktechnik eine nicht von der Wellenlänge abhängige Größe wie die Extinktion favorisiert. Deshalb wird nicht die Extinktion, sondern die optische Dichte D_{opt} der Farbe bestimmt [33]. Analog zum Gesetz nach BEER-LAMBERT gilt für die optische Dichte nach Gleichung 2.3 [28]:

$$D_{opt} = -\log(\beta_{min}) \quad 2.3$$

Dabei ist β_{min} das Minimum des Reflexionsgrades. Dieses Minimum wird durch Multiplikation des Reflexionsgrades mit einem einheitlichen schmalbandigen Absorptionsfilterspektrum, dessen Lage im Minimum des Reflexionsgrades liegt, bestimmt.

Allgemein ist es in der Drucktechnik üblich einen relativen Ausdruck der optischen Dichte anzugeben. Dabei wird die optische Dichte der Druckfarbe auf die optische Dichte eines ideal diffus reflektierenden Materials referenziert. Diese optische Dichte wird allgemein als Farbdichte bezeichnet. Wird nach Gleichung 2.4 die Farbdichte der Druckfarbe D_{Farbe} nicht auf ein ideales Material, sondern auf den unbedruckten Bedruckstoff $D_{Bedruckstoff}$ referenziert, wird diese relative optische Dichte als relative Farbdichte D bezeichnet.

$$D_{rel} = D_{Farbe} - D_{Bedruckstoff} = -\log\left(\frac{\beta_{min, Bedruckstoff}}{\beta_{min, Farbe}}\right) \quad 2.4$$

Nur für die relative Angabe der optischen Dichte zum Bedruckstoff gilt der eingangs erläuterte Zusammenhang zwischen der gedruckten Schichtdicke der Druckfarbe nach TOLLNAR und ERNST.

Nach DIN 16536 sind Form und Lage der schmalbandigen Absorptionsfilter, mit denen β_{min} berechnet wird, für normierte Druckfarben festgelegt. Relative optische Dichten, die über

diese fest an das Reflexionsspektrum genormter Druckfarben gekoppelten Absorptionsfilter berechnet werden, werden in der europäischen Druckbranche als relative Farbdichte D bezeichnet. Der Einfachheit halber und in Anlehnung an die Praxis wird in dieser Arbeit der Begriff Farbdichte für die relative Farbdichte verwendet.

Die Farbdichte kann auch direkt aus den Spektren der verwendeten Filter, Eingangslichtart und Reflexion der Farbe berechnet werden [59]. Dabei ist in Gleichung 2.5 eine Summenschreibweise gewählt worden, da alle Spektralphotometer eine diskretisierte Ausgabe besitzen.

$$D = -\log \frac{\sum \left(\frac{\beta_{ref, Farbe}}{\beta_{ref, Bedruckstoff}} \right) \cdot S_{Licht} \cdot S_{Filter}}{\sum S_{Licht} \cdot S_{Filter}} \quad 2.5$$

Dabei entsprechen β_i den Reflexionsspektren von Farbe und Bedruckstoff, und S_i den diskreten Verteilungen der Eingangs- und Filterspektren. Mit Hilfe dieser Beschreibung kann per Spektralphotometer und den Eingangs- sowie Filterspektren nach DIN 16536 ebenfalls eine Farbdichte bestimmt werden. Werden nicht die normierten Filter verwendet, kann auch die optische Dichte (häufig auch als spektrale Farbdichte bezeichnet) berechnet werden, die nicht nur für genormte Druckfarben gültig ist. Dazu wird mit der Lage des Absorptionsfilters im Minimum des Reflexionsspektrums gerechnet.

2.3.3 Farbdichtemessung nach DIN 16536

Die Messung der Farbdichte geht zurück auf die Messung der optischen Dichte in Fotolaboren Ende der 40er-Jahre. MACBETH etablierte dabei das Verfahren der Densitometrie, um Qualitätssicherung und Standardisierung in dieser Branche zu gewährleisten. In der Filmreproduktionsbranche wurde die optische Dichte der Transmission gemessen. Somit musste dieses Verfahren modifiziert werden, um es für Reflexionsmessungen in der Druckbranche zu übernehmen [89]. Erhebliche Probleme in der Reproduzierbarkeit von Ergebnissen

zwischen verschiedenen Messgeräten zwangen die Hersteller zu einem genormten, einheitlichen und definierten Aufbau der Messgeräte [19, 91].

In DIN 16536 sind sowohl die Begrifflichkeiten, als auch der Aufbau zur Messung der Größe der Farbdichte genormt. Dabei werden hierfür viele Merkmale festgelegt. Messgeometrie, Eingangs- und Filterspektren, sowie der Einsatz einer Polarisationseinrichtung sind dabei definiert. Weiter ist eine Methode zur Überprüfung der Absolutgenauigkeit des Messgerätes, sowie zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Polarisations-einrichtung dargelegt. Messgeräte zur normkonformen Messung der Farbdichte heißen Densitometer. Mit ihnen wird die gegenfarbengefilterte Reflexion R nach dem in Abbildung 11 dargestellten Aufbau gemessen [35].

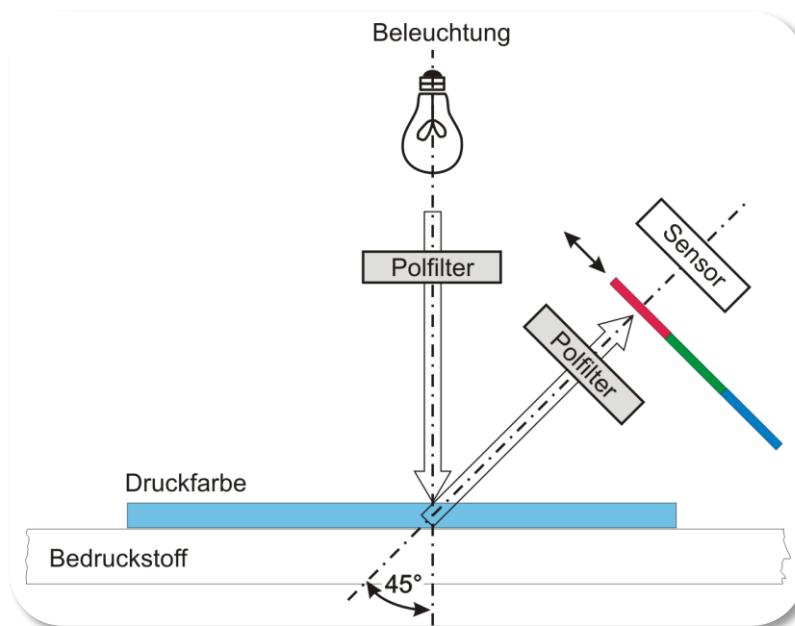


Abbildung 11: Prinzipieller Aufbau eines Densitometers. Die Probe wird mit einem Eingangsspektrum entsprechend der Lichtart A polarisiert unter einem Einfallswinkel von 0° beleuchtet. Detektiert wird durch einen zum ersten Polarisationsfilter um 90° gedrehter Polarisationsfilter die gegenfarbengefilterte Reflexion R unter einem Winkel von 45° bezogen zur Beleuchtungsebene.

Dabei wird eine Probe unter 0° zur Senkrechten mit einem linear polarisierten Spektrum der Normlichtart A beleuchtet. Ein Sensor detektiert die Reflektion unter einem Winkel von 45° zur Senkrechten. Im Strahlengang des Detektors muss ein

zum ersten Polarisationsfilter um 90° gedrehter weiterer Polarisationsfilter vorhanden sein. Des Weiteren muss ein der Druckfarbe entsprechender Absorptionsfilter in dem Strahlengang des Detektors verbaut sein.

Absorptionsfilter nach DIN 16536

In Abbildung 12 sind die Absorptionsspektren der Filter aufgetragen. Die Spektren der Filter müssen symmetrisch zu ihrem Transmissionsmaximum sein. Die Lage des Transmissionsmaximums soll im Absorptionsmaximum der Druckfarbe liegen. Nach ISO 2846-1 und PSO sind die Reflexionsspektren der Druckfarben genormt [18, 67]. Da dieses Messverfahren nur für genormte Druckfarben zulässig ist, kann je ein Filter für je eine der Druckfarben definiert werden. Das Transmissionsmaximum der drei Filter soll demnach bei $430 \pm 5 \text{ nm}$, $530 \pm 5 \text{ nm}$ und $620 \pm 5 \text{ nm}$ liegen. Weiter sind nach DIN 16536 für jeden Filter zwei Stützpunkte festgelegt. Dabei muss bei einer Bandbreite von 10 nm die Absorption bei mindestens 50% und bei 20 nm mindestens 99,9% betragen.

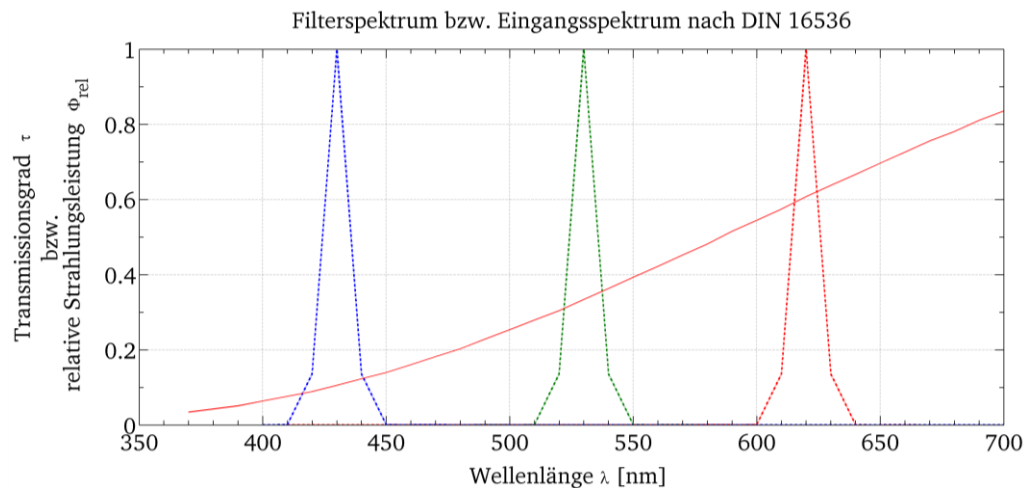


Abbildung 12: Aufgetragen ist der Transmissionsgrad τ und die relative Strahlungsleistung Φ_{rel} der Filter und Beleuchtung für eine Farbdichtemessung nach DIN 16536 über der Wellenlänge λ .

Die hier beschriebenen Filter entsprechen der genormten schmalbandigen Variante der Absorptionsfilter. Nach DIN 16536 sind ebenfalls breitbandige Absorptionsfilter definiert. Diese werden heute jedoch seltener eingesetzt, da die interinstrumentelle Übereinstimmung der Messgeräte mit schmal-

bandigen Filtern besser ist [89, 91]. Um die Farbdichte D der Druckfarbe Schwarz (K) zu messen, ist nach DIN 16536 ein vierter Filter zu verwenden. Das Absorptionsspektrum dieses Filters entspricht der Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ für Ta-gesehen nach CIE bzw. DIN 5031-3 [38, 40].

Eingangsspektrum nach DIN 16536

Weiter ist in Abbildung 12 in Rot und einer durchgehenden Linie die Verteilung der relativen Strahlungsleistung Φ_{rel} über der Wellenlänge λ der Lichtart A eingezeichnet. Definiert ist die spektrale Verteilung der relativen Strahlungsleistung $\Phi_{rel}(\lambda)$ nach Gleichung 2.6 [23].

$$(\Phi_{rel})\lambda = 100 \cdot \left(\frac{560}{\lambda}\right)^5 \cdot \frac{e^{\frac{1,435 \cdot 10^7}{2848 \cdot 560} - 1}}{e^{\frac{1,435 \cdot 10^7}{2848 \cdot \lambda} - 1}} \quad 2.6$$

Realisiert ist die Normlichtart A als PLANCKscher Strahler mit einer Farbtemperatur von 2856K. Die spektrale Verteilung von Normlichtart A ist unter anderem in CIE 15:2004, DIN 5033 (Teil 7) und DIN 16536 festgelegt [23, 29, 35, 60].

Polarisationseinrichtung nach DIN 16536

Unter einer Polarisationseinrichtung ist die in Abbildung 13 dargestellte Anordnung zweier Polarisationsfilter zu verstehen[36]. Filter 1 dient als Polarisator und Filter 2 als Analy-sator [22, 49].

Beide Polarisationsfilter sind dafür gekreuzt angeordnet. Das bedeutet, dass die Druckprobe mit polarisiertem Licht be-leuchtet wird und der zweite Polarisationsfilter um 90° zu ers-ten gedreht im Detektionsstrahlengang angeordnet ist. Dieser Analysator absorbiert nicht unpolarisiertes Licht. An Oberflä-chen wird polarisiertes Licht reflektiert und nicht unpolari-siert. Beim Eindringen in Materialien oder durch Streuung in diesen Materialien wird polarisiertes Licht jedoch depolari-siert. Durch diesen Effekt kann der Anteil an oberflächenre-flektiertem Licht stark reduziert werden [128]. Genau dieser

Effekt wird für eine Messung der Farbdichte nach DIN 16536 genutzt, um den Anteil an Oberflächenreflexion zu mindern.

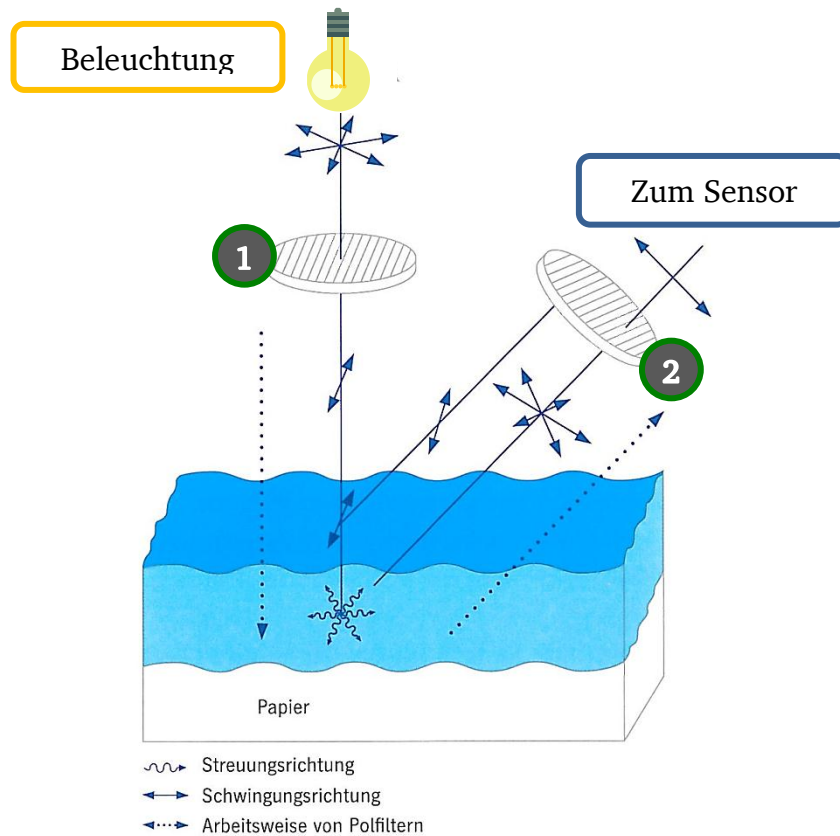


Abbildung 13: Wirkungsprinzip der Polarisationseinrichtung. Polarisationsfilter 1 wirkt als Polarisator und polarisiert das Licht der Beleuchtung. Polarisationsfilter 2 ist um 90° zum Polarisator gedreht und wirkt als Analysator. Er absorbiert den Anteil an oberflächenreflektiertem Licht, da dieser Anteil nicht unpolarisiert wird [57].

2.3.4 Geräte zur Farbdichtemessung

In der aktuellen Praxis reicht das Spektrum für eine Prozesskontrolle der aufgetragenen Druckfarbe von einer durch den Drucker durchgeführten Messung mit Handgeräten bis hin zu automatisch messenden Offline-Densitometern, die direkt eine Stellgröße für den Farbauftrag ableiten. Die Methode der Prozesskontrolle hängt von der Aktualität der eingesetzten Druckmaschine, der Druckmaschinengröße und der Größe des Druckereibetriebes ab.

Allgemein erfolgt der reale Aufbau der Densitometer in starker Anlehnung an die normativen Vorgaben der DIN 16536. Die konkrete Umsetzung variiert jedoch zwischen den Herstellern erheblich. Als Beleuchtung wird herkömmlich eine gasgefüllte Halogenglühlampe eingesetzt. Um eine dauerhafte Reproduzierbarkeit gewährleisten zu können, wird die Versorgungsspannung präzise aufbereitet. Um dies zu umgehen, werden zunehmend LEDs verwendet. Das Emissionsspektrum von LEDs entspricht bauartbedingt nicht der geforderten Normlichtart A. Deshalb werden häufig Filter nachgeschaltet. Die spektrale Verteilung der relativen Strahlungsleistung Φ_{rel} einer ungefilterten LED wird durch Peaks charakterisiert. Somit bietet es sich hier an, das Eingangsspektrum dem geforderten schmalbandig zu detektierenden Reflexionsspektrum anzupassen. Eine weitere Variante ist der Einsatz von Softwarefiltern. Dabei wird das Spektrum der Reflexion der Druckfarbe mittels eines Spektralphotometers ermittelt. Durch Multiplikation dieses Spektrums mit den Filterwertvorgaben der Norm kann somit die Farbdichte berechnet werden.

Handgeräte

Handmessgeräte sind die einfachste Umsetzung der normativen Forderung zur Bestimmung der Farbdichte. Sie müssen den praktischen Ansprüchen einer Druckerei genügen. Das bedeutet, dass sie klein, leicht und stabil sein müssen. Dabei ist der Genauigkeitsanspruch im Vergleich zu den nachstehend erläuterten Leitstandgeräten untergeordnet. Sie dienen eher als Kontrollgerät in der Produktion. In Abbildung 14 sind zwei am Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren (IDD) vorhandene Messgeräte dargestellt. Dabei ist das Chamelion der Firma koeth hervorzuheben, bei welchem im Gegensatz der Vorgaben aus DIN 16536 LEDs zur Beleuchtung eingesetzt werden [79]. Ein weiteres Handmessgerät ist das SpectroDens der Firma Techkon. Hier wird das Reflexionsspektrum gemessen und per Software die Farbdichte berechnet [114]. Dieses Messgerät wurde für die Messungen in Kapitel 3 verwendet.



Abbildung 14: Beispiele für Handmessgeräte: viptronic C9 (gasgefüllte Lampe & Hardwarefilter) und koeth Chameleon (LED-Beleuchtung).

Allgemein ist in dieser Gerätekategorie die Umsetzung der normativen Aspekte wie Beleuchtungs- und Filterspektrum am variantenreichsten. Deshalb sind Ergebnisse verschiedener Messgeräte häufig signifikant unterschiedlich.

Leitstandgeräte

Leitstandmessgeräte entsprechen prinzipiell dem Aufbau der Handgeräte. Hier kommt es jedoch nicht auf hohe Portabilität oder niedrige Produktionskosten an. Viel mehr stehen bei Geräten dieser Klasse ein Höchstmaß an Mess- und Wiederholungsgenauigkeit im Vordergrund. Zudem sind Leitstandgeräte in der Regel mit einer Positioniereinrichtung und einer automatischen Sucheinrichtung für den Messort ausgestattet. Als Beispiel dieser Klasse ist in Abbildung 15 das Messgerät fm19 der Firma grapho metronic Meß- und Regeltechnik GmbH dargestellt [55]. Das Messgerät ist dabei in die Farbregelanlage am Leitstand der Druckmaschine der Firma manroland AG integriert.

Sämtliche Referenzmessungen dieser Arbeit sind mit diesem Messgerät durchgeführt worden.



Abbildung 15: Beispiel für ein Leitstandmessgerät. Hier als Beispiel die Farbregelanlage des Leitstandes einer Druckmaschine „ColorPilot“ von manroland mit dem Messgerät fm19 der grapho metronic Meß- und Regeltechnik GmbH. Dieses Gerät wurde für sämtliche Referenzmessungen in dieser Arbeit verwendet.

Inlinegeräte

Bisherige Inline-Messsysteme für die Farbdichte waren Lösungen aus dem Sektor der Rollendruckmaschinen, die keine Offlinemessung erlauben. Diese Messsysteme sind reine Zusatzgeräte, kostenintensiv und bauartbedingt mäßig genau messend. Aus diesen Gründen und der Möglichkeit im Bogen- und Flachdruck Messungen offline durchführen zu können, führten dazu, dass sich Inlinemesssysteme im Bogen- und Flachdruck nicht durchsetzen konnten. Um dennoch eine closed-loop Regelung des Farbauftrages zu realisieren, gab es in letzter Zeit vermehrt Ansätze, um eine Inlinemessung der Farbdichte in Bogen- und Flachdruckmaschinen profitabel zu gestalten. Auch bei Inlinedensitometern entspricht der generelle Aufbau den Vorgaben nach DIN 16536. Aufgrund der hohen Produktionsgeschwindigkeit einer Druckmaschine, müssen Inlinemessgeräte sehr schnell sehr viele Messungen durchführen können. Um das Druckbild in der Druckmaschine nicht zu beschädigen, arbeiten sie zudem berührungslos.



Abbildung 16: Beispiel eines Inlinemessgerätes zur Bestimmung der Farbdichte. Abgebildet (gelbe Rahmen) ist hier das VipPAQ der Firma x-rite [129].

Um eine Messung auszulösen, werden sie entweder durch externe Signale oder durch bestimmte Druckmuster getriggert. Wegen der geringen Flexibilität und des enormen finanziellen Aufwandes einer solchen Messanlage wird sie häufig nur im Rollenoffset oder in den größten Bogendruckmaschinen eingesetzt. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Farbdichte über eine große Druckbreite gemessen werden muss. Dieser Anspruch wird in der Regel durch eine Kaskadierung mehrerer Anlagen über die Bogenbreite realisiert. Durch die aus der Einbausituation resultierende mechanische Belastung des Messgerätes, die geforderte Messgeschwindigkeit sowie die berührungslose und damit nicht optimal abgeschirmte Messung, sind Mess- und Wiederholgenauigkeit nicht mit den Ergebnissen der Leitstandgeräte vergleichbar. Bekannte Geräte dieser Messgeräteklasse sind beispielsweise das in Abbildung 16 dargestellte vipPAQ von x-rite und das Messgerät IDS von grapho metronic [53]. Dabei ist zu erwähnen, dass das vipPAQ nur Relativwerte zu einer Referenz ausgibt [129].

Innovative Inlinemessgeräte

Inline messende Systeme werden zwar vom Markt bevorzugt, setzen sich jedoch aufgrund von hohen Investitionskosten, mangelnder Einsatzflexibilität und schwer auf offline gewonnene Ergebnisse übertragbarer Resultate nicht durch. Eine der aktuellen Lösungen verwendet einen zusätzlichen Sensor, der

in der Druckmaschine ein nicht normkonformes Signal über die Druckfarbe aufnimmt. Die Information dieses Signals wird anschließend auf das Ergebnis einer zeitnah durchgeführten Offlinemessung mittels Densitometer referenziert. Änderungen der Farbdichte können somit relativ zur Referenzmessung detektiert und Trends ausgelesen werden [78].

2.3.5 Änderung der Farbdichte durch Trocknung

Aus Erfahrungswerten der Druckpraxis ist bekannt, dass die Farbdichte während der Trocknung abnimmt. Die Änderung der Farbdichte erfolgt in Abhängigkeit der Zeit und des Bedruckstoffes [6, 57]. Die Farbdichte ändert sich auf ungestrichenen Bedruckstoffen stärker und länger, als auf gestrichenen Bedruckstoffen. Quantitativ sind Änderungen der Farbdichte D bei gestrichenen Bedruckstoffen über einige Stunden in einer Größenordnung von ca. 3% der Farbdichte D bekannt. Bei ungestrichenen Bedruckstoffen kann sich die Farbdichte über viele Stunden bis hin zu einigen Tagen ändern. Die Änderung ΔD beträgt bis zu 9% bezogen auf den Messwert der Farbdichte D im nicht getrockneten Zustand [45].

2.4 Stand der Wissenschaft

Im vorangegangenen Kapitel wurde der aktuelle Stand der Technik gezeigt. Im wissenschaftlichen Kontext sind die Forschungsanstrengungen hinsichtlich des Themas der Farbdichte in den letzten 20 Jahren sehr begrenzt. Zum einen wurden Beiträge zur Einführung der schmalbandigen Filter, die die Reproduzierbar- und Messgerätetauglichkeit verbessern sollten, gebracht [13]. Die letzte Entwicklung der Farbdichtemesung war die Einführung von Polarisationsfiltern, um den Anteil der Oberflächenreflexion an der Gesamtreflexion zu reduzieren. Hauptaugenmerk war hierbei auf die Unterdrückung der Messwertänderung der Farbdichte durch Trocknungseffekte. Hierzu gab es bereits 1959 von HULL eine Veröffentlichung, die die Vorteile und Funktionsweise einer Polarisationssein-

richtung auf die Messung der Farbdichte darstellen [63]. In verschiedenen Veröffentlichungen von CELIO, MAST und OTT in den Jahren 1980-1991 wurde der Effekt und die Wirkungsweise der Polarisationseinrichtungen auf die Farbdichtemessung näher begründet [20, 21]. MENTZER veröffentlichte 1991 Untersuchungen der Vorteile von Messungen mit Polarisationseinrichtung hinsichtlich der Vorhersagbarkeit der Farbdichte von getrockneten Drucken [87]. HOFFMANN veröffentlichte 1998 Kritik am Einsatz von Polarisationseinrichtungen, da sie den Messwert der physikalischen Größe der Farbdichte unzulässig beeinflussen [61]. Allgemein gilt die Entwicklung der densitometrischen Farbdichtemessung als ausreichend bearbeitet, der Einsatz von Polarisationsfiltern als Standard und der gesamte Vorgang der Farbdichtemessungen durch Normen, wie DIN 16536 geregelt [35].

Einige Veröffentlichungen beschäftigen sich mit dem Zusammenhang zwischen der Schichtdicke der Druckfarbe und der Farbdichte. Dabei wird der von TOLLNAR UND ERNST gezeigte Zusammenhang durch weitere Modelle optimiert. CONNEF veröffentlichte 1990 dazu eine gute Übersicht [12]. RUOKOSUO und FUCHS zeigten Korrelationen zwischen Druckergebnissen und Messungen der Farbdichte [105]. HUPP zeigte, dass aus Messungen mit einem Densitometer eine Kontrolle des Druckergebnisses von Interferenz-Effektfarben möglich ist [64, 65, 73].

Weiter gibt es mehrere Veröffentlichungen, die sich mit der Inline-Messung der Farbdichte bzw. der Farbschichtdicke im Offsetdruck beschäftigen. Ein Inline-Messverfahren der Farbschichtdicke auf den Farbwalzen eines Druckwerkes wurde bereits 1982 von RODRIGUEZ-GILES und SCHEUTER vorgestellt [108]. FETTER zeigte 2009 eine Methode, die durch Beimengung von Nanopartikeln die Schichtdickenbestimmung auf Farbwalzen ermöglicht [47]. SIMOMAA und KAIVOSOJA entwickelten eine Messeinrichtung, die aus dem Verhältnis der Farbdichte im Glanz und einer Messung der Farbdichte unter $0^\circ/45^\circ$ eine zuverlässige Farbdichte in der Druckmaschine messen kann [111]. KISHNER veröffentlichte eine Lösung für

die Belichtung eines Inline-Densitometers auf Basis einer Xenon-Blitzbeleuchtung [77]. Weiter zeigte er den Einfluss von Druckparametern auf inline gemessenen Farbdichte [76].

Weiter gibt es Untersuchungen, die sich mit möglichen Einflüssen, wie der Oberfläche der Druckfarbe, Glanzänderungen während der Trocknung der Druckfarbe oder Trocknungsvorgängen der Druckfarbe allgemein, auf die Messung der Farbdichte auseinandersetzen. So gibt es 1997 und 2005 Untersuchungen von GLATTER und PRESTON, die Änderungen des Glanzes nach Auftrag der Druckfarbe beschreiben [50, 99]. NIESSNER, WORDEL und LOIBL veröffentlichten Untersuchungen über das Wegschlagverhalten (Trocknen) von Offsetdruckfarben [90, 127]. Dabei geht es jedoch immer um die Bestimmung von Trocknungs- und Setzzeiten der Farben und nicht um die Änderung ihrer optischen Eigenschaften durch den Trocknungsvorgang. Sämtliche Ergebnisse werden nicht in Zusammenhang mit Messungen der Farbdichte gebracht.

Dem Verfasser dieser Arbeit ist kein Ansatz oder eine Lösung bekannt, in der eine Messung einer normäquivalenten Farbdichte mittels eines Druckinspektionssystems realisiert ist. Sämtliche Forschungsanstrengungen hinsichtlich einer Kameramessung zielen auf die Schätzung von Reflexionsspektren aus den Signalinformationen der Kamerakanäle ab [120-123].

2.5 Ziel der Arbeit und Vorgehensweise

Ziel ist es, mit einem Druckinspektionssystem eine Farbdichte zu messen, die im Ergebnis äquivalent zu einer normgerecht gemessenen Farbdichte ist. Dazu muss ein Transformationsnachweis gefunden werden, der zeigt, dass aus dem RGB-Signal der Kamera des Druckinspektionssystems eine normäquivalente Farbdichte bestimmt werden kann. Zum Zeitpunkt der Messwertaufnahme durch das Druckinspektionssystem ist die Druckfarbe nicht getrocknet. Weiter sind die Trocknungszustände der Druckfarben infolge des sequentiellen Auftrags in der Druckmaschine unterschiedlich. Es ist bekannt, dass Druckfarben infolge von Trocknungsprozessen ih-

re Farbdichte ändern. Damit muss als weiteres Ziel ein Modell gefunden werden, welches die Änderung der Farbdichte während der Trocknungszeit, beginnend wenige Millisekunden nach Farbauftrag, beschreibt.

In einem ersten Schritt werden die grundsätzlichen Eigenschaften der Messgröße der Farbdichte dargestellt und Unterschiede zwischen einer normgerechten Messung und den Randbedingungen in der Messwertgenerierung durch das Druckinspektionssystem gezeigt und bewertet. Im Anschluss wird dargestellt, wie mit einem Druckinspektionssystem zunächst eine gerätespezifische Farbdichte gemessen wird und dieses Ergebnis in eine normäquivalente Farbdichte transformiert werden kann. Um als Ausgabewert für die normäquivalente Farbdichte ein auf ein Referenzmessgerät rückführbares Ergebnis zu erzeugen, wird ein Konzept und eine Methode für eine Kalibrierung vorgestellt. Mit dieser Methode werden Kalibrierfunktionen bestimmt, mit denen das Ziel der Bestimmung einer rückführbaren normäquivalenten Farbdichte mit einem Druckinspektionssystem realisiert werden kann.

Um das zweite Ziel der Modellierung der Farbdichteänderung während der Trocknungszeit zu erreichen, ist ein zweiter Versuchsstand entwickelt worden, der es ermöglicht die Farbdichte während der Trocknung zu messen. Dabei sind Messungen wenige Millisekunden nach Farbauftrag ebenso möglich, wie nach mehreren Stunden oder sogar Tagen. Zudem wurde darauf geachtet, dass die Farbe unter realen Bedingungen des Offsetdruckes (Feuchtmittel, Druckplatte, Gummituch, etc.) auf den Bedruckstoff aufgetragen wird. Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen soll ein empirisches Modell abgeleitet werden, mit dessen Hilfe die zeitliche Beschreibung der Farbdichte während der Trocknung möglich ist. Dabei werden Einflüsse durch den Bedruckstoff und auch der Druckfarbe berücksichtigt.

3 Messung einer normäquivalenten Farbdichte

In diesem Kapitel soll generell gezeigt werden, dass es möglich ist, mit einem Druckinspektionssystem eine, der normgerecht gemessenen Farbdichte D äquivalente, Farbdichte $D_D \Leftrightarrow D^*_{DIS}$ zu bestimmen. Dazu wird als erstes die generelle Eignung der Kamera für eine Farbdichtemessung geklärt, sowie die Messwertaufnahme und Berechnung der Farbdichte D^*_{DIS} aus den RGB-Daten des Druckinspektionssystems erläutert. Im Anschluss werden die geforderten Eigenschaften in der Messwertaufnahme für eine Messung der Farbdichte D nach DIN 16536 und der Messwertaufnahme des Druckinspektionssystems gegenübergestellt. Basierend auf dieser Gegenüberstellung wird der quantitative Einfluss der unterschiedlichen Merkmale auf den Messwert der Farbdichte dargestellt. Aus diesen Erkenntnissen wird zuletzt eine Transformationsfunktion erarbeitet. Mit dieser ist eine Umrechnung der Ausgabe-
werte des Druckinspektionssystems in eine normäquivalente Farbdichte möglich.

3.1 Messwertaufnahme und Eignung der Kamera

In diesem Unterkapitel wird die Messwertaufnahme des Druckinspektionssystems erläutert. Dazu wird zunächst der Aufbau des Messfeldes dargestellt. Im Anschluss wird die Berechnung der Farbdichte D^*_{DIS} aus den RGB-Daten des Bildes, welches mit dem Druckinspektionssystem aufgezeichnet wurde, definiert. Zum Schluss wird ein Nachweis über die Kameralinearität erbracht.

3.1.1 Das Messfeld

Das Messfeld ist definiert als der Flächenbereich, innerhalb dessen die Messgröße aufgenommen wird [36]. Bei einer Messung der Farbdichte durch ein Druckinspektionssystem entspricht damit das Messfeld zunächst der projizierten Größe eines Pixels der Kamera. Die Größe dieses Messfelds kann

auch als native Größe des Messfeldes bezeichnet werden und das Messfeld als Primärmessfeld. Die Größe des Primärmessfeldes wird durch die Auflösung und Größe des Kamerasensors, dem Abstand zwischen Messobjekt und Sensor und der dazwischen geschalteten Optik bestimmt. Dieses Messfeld ist jedoch im Allgemeinen sehr klein, da ein primäres Ziel der Bildaufnahme für eine Druckinspektion eine hohe Ortsauflösung ist. Aus diesem Grund werden mehrere dieser Primärmessfelder zu dem Messfeld zusammengefasst, innerhalb dessen die Messwertaufnahme für die Farbdichte erfolgt.

In Abbildung 17 ist der Aufbau eines Messfeldes für die Messwertaufnahme durch das Druckinspektionssystem dargestellt. Das Primärmessfeld entspricht dabei einem Pixel des aufgenommenen Bildes und wird in der Skizze durch die roten Quadrate dargestellt.

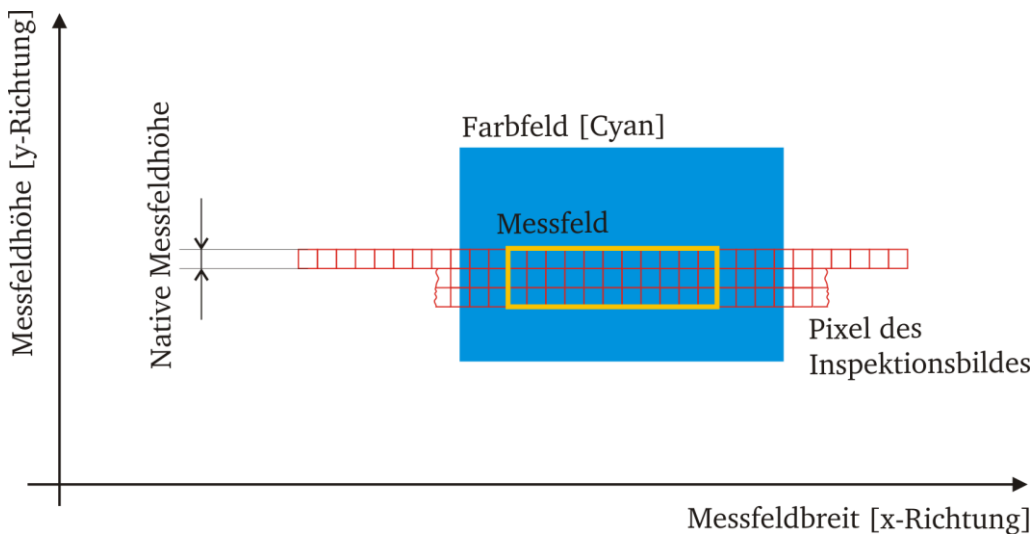


Abbildung 17: Aufbau des Messfeldes für eine Farbdichtemessung mittels Inspektionskamera. Als Primärmessfeld werden die einzelnen Pixel bezeichnet. Durch Zusammenschluss mehrerer Pixel, wird das Messfeld vergrößert (gelbes Feld).

Diese Größe (Höhe x Breite) wird durch die Einbausituation bestimmt und lag im Anwendungsfall dieser Arbeit bei einer Kantenlänge von 0,05mm. In Messfeldbreite wird das Messfeld vergrößert, indem mehrere Pixel des Sensors zusammengefasst werden. Dieses zusammenfassen wird auch Binning genannt [7]. Wichtig ist hierbei, dass nicht auf dem Chip mehrere Pixel zusammengeschlossen werden, sondern nur die

Information mehrerer Pixel zusammengefasst wird. Durch den Einsatz einer Zeilenkamera in dem Druckinspektionssystem, müssen für eine Ausdehnung des Messfeldes in Messfeldhöhe (y-Richtung) mehrere nacheinander folgende Aufnahmen der Zeile zusammengefasst werden. Auf diese Art und Weise kann das Messfeld in eine beliebige Größe gebracht werden und durch Mittelwertbildung innerhalb des Messfeldes die Absolutwert- und Wiederholgenauigkeit erhöht werden, ohne die hohe Ortsauflösung der Bildaufnahme zu verändern.

3.1.2 Definition und Berechnung der Farbdichte D^*_{DIS}

Aus dem RGB-Signal der Kamera soll eine der normgerecht gemessenen Farbdichte D vergleichbare Größe D^*_{DIS} berechnet werden. Nach Abschnitt 2.3.2 ist die Farbdichte aus einem schmalbandigen Ausschnitt des Reflexionsgrades im Minimum des Reflexionsgrades berechnet. Für eine Messung der Farbdichte D^*_{DIS} mit dem Druckinspektionssystem wird als Reflexionsgrad β^*_{DIS} der gerätespezifisch gefilterte Signalwert einer der RGB-Kanäle verwendet. Entsprechend des gewählten Messfeldes (vgl. Abschnitt 3.1.1) wird über die Anzahl der im Messfeld berücksichtigten Pixel ein Mittelwert gebildet. Um die Farbdichte D^*_{DIS} zu berechnen, wird der gemittelte Signalwert des Filters mit dem höchsten Absorptionsverhalten gegenüber der gedruckten Farbe verwendet.

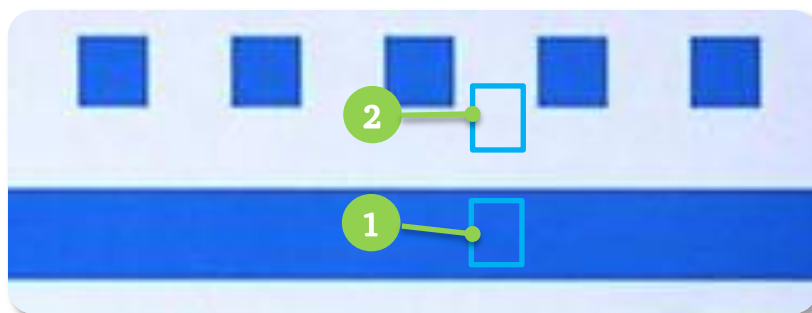


Abbildung 18: Vergrößerter Ausschnitt einer Aufnahme des Druckinspektionssystems. Zu sehen ist die Anordnung der Messfelder: 1 entspricht dem Messfeld, in welchem der Messwert des Volltonfeldes (Index c vgl. color) aufgenommen wird. 2 entsprechen dem korrespondierendem Messfeld, in welchem der Messwert des Bedruckstoffes (Index S vgl. substrate) aufgenommen wird.

In Abbildung 18 sind diese Bildausschnitte in den blauen Rahmen auf dem Druckbild abgebildet. Da die Messwertaufnahme von β^*_{DIS} nicht den Spezifikationen der DIN 16536 entspricht, ist der Wert von β verschieden zu einer normgerechten Messung. Darum wird die so berechnete Farbdichte mit D^*_{DIS} bezeichnet.

Um den Relativbezug zum Bedruckstoff umsetzen zu können, muss für das gewählte Messfeld der Druckfarbe (Index c) eine korrespondierende Fläche ohne Farbauftrag im Bild (Index s) verwendet werden. In Abbildung 18 ist die Anordnung der Messfelder zu sehen. Dort entspricht das Messfeld (1) dem Volltonfeld (Index c) und Messfeld (2) dem korrespondierenden Feld auf dem Bedruckstoff, um eine permanente Weißreferenzierung und damit den Relativbezug zum Bedruckstoff realisieren zu können. Nach Formel 3.1 kann somit D^*_{DIS} berechnet werden.

$$D^*_{DIS} = -\log \left(\frac{\beta^*_{DIS,s} - \psi_s}{\beta^*_{DIS,c} - \psi_c} \right) \quad 3.1$$

Streulichteinflüsse sowie thermische Umgebungsänderungen haben, gerade bei Messungen von hohen Farbdichten, einen starken Einfluss auf das Ergebnis und müssen bestmöglich kompensiert werden. Dazu wird ein Schwarzoffset ermittelt. Dabei wird ohne Beleuchtung der Detektionsstelle ein Kamerabild aufgenommen. Aus diesem Bild kann für jedes Messfeld auf dem Volltonfeld und auf dem Bedruckstoff ein Korrekturwert ψ für den Reflexionsgrad β^*_{DIS} bestimmt werden. ψ_c ist der Korrekturwert für das Volltonfeld und ψ_s für die Bedruckstoffreferenz.

3.1.3 Linearität der Kamera

Unter der Linearität einer Kamera wird das lineare Verhalten zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße verstanden. In Abbildung 19 ist eine symbolische Darstellung des Systems „Kamera“ dargestellt. Die Eingangsgröße der Kamera ist das einfallende Licht. Die Ausgangsgröße ist ein Signal in Form einer

elektrischen Spannung für jeden der drei RGB-Kanäle. Die Umformung innerhalb der Kamera muss über einen linearen Zusammenhang erfolgen, damit die Kamera als linear gilt.

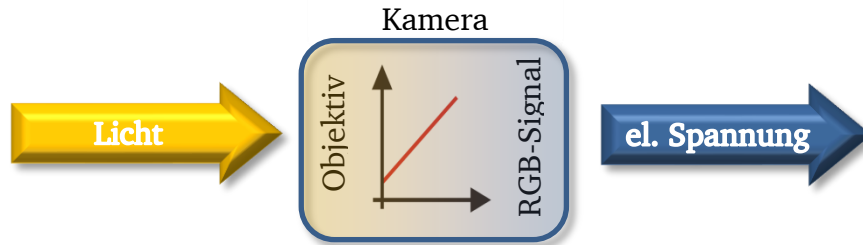


Abbildung 19: Symbolische Darstellung der Ein- und Ausgangsgröße der Kamera. Die Transformation der Lichtenergie in elektrische Spannung erfolgt über einen linearen Zusammenhang.

Ein lineares Verhalten zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße der Kamera ist essenziell, um ohne Korrekturen aus ihrer Ausgangsgröße eine Farbdichte D^*_{DIS} bestimmen zu können. Auch eine Transformationsberechnung in eine normäquivalente Farbdichte bzw. eine Kalibrierung auf ein Referenzgerät sind für nichtlineare Kameras beleuchtungsstärkenabhängig. Verhalten sich Ein- zu Ausgangsgrößen nicht linear zu einander, bedeutet das, dass beispielsweise Beleuchtungsschwankungen zu unterschiedlichen Werten der Farbdichte D^*_{DIS} für ein identisches Volltonfeld einer Druckfarbe führen. Eine nicht lineare Abhängigkeit des Verhältnisses von Aus- zu Eingangsgröße der Kamera durch die Beleuchtung ist nicht praxistauglich korrigierbar. Dieser Effekt tritt unter anderem durch Vignettierung der Optik sowie nicht realisierbarer konstanter Beleuchtung des Messfeldes in jeder Messsituation auf.

Das Verhalten von Ein- zu Ausgangsgröße wurde für die Kamera TVI XIIMUS des Inspektionssystems untersucht. Dazu wird das Bild eines Targets, welches dunkle und helle Volltonfelder enthält, mittels der Kamera aufgenommen und die RGB-Werte gespeichert. Die Aufnahme dieser Volltonfelder erfolgt sequenziell unter verschiedenen Belichtungszeiten. Variation der Belichtungszeit entspricht der Variation des Wertes der Eingangsgröße. Beispielsweise wird nach 50ms Belichtungszeit nur die Hälfte der Anzahl an Photonen auf den Kamerasensor gelangen, als es bei einer Belichtungszeit von

100ms der Fall ist. Nach den Aufnahmen unter variierenden Belichtungszeiten, werden, entsprechend der festgelegten Messfeldgröße für eine Farbdichtemessung durch das Druckinspektionssystem, Mittelwerte der RGB-Werte für die hellen und dunklen Volltonfelder bestimmt. Anschließend werden die Mittelwerte der RGB-Werte für die hellen und dunklen Volltonfelder über der Belichtungszeit aufgetragen. In Abbildung 20 sind exemplarisch die Ausgabewerte des Grünkanals der Kamera in Digital Counts (DC) über der Belichtungszeit aufgetragen. Zudem sind jeweils eine interpolierte Gerade und die zugehörigen Residuen dargestellt.

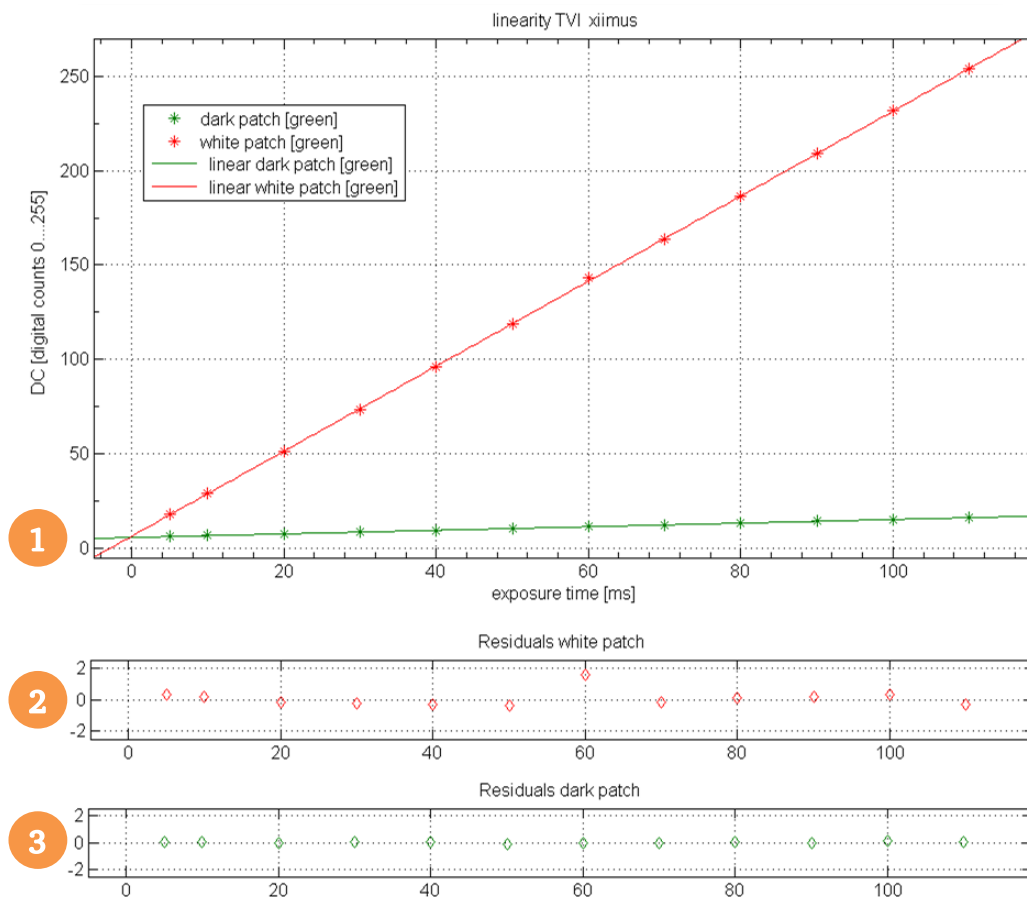


Abbildung 20: Aufgetragen sind in (1) die Ausgabewerte des G-Kanals (Grün) der Kamera TVI XIIMUS über der Belichtungszeit. Als Nachweis des angenommenen linearen Zusammenhanges zwischen Ein- und Ausgangsgröße der Kamera, sind die Ergebnisse für die Messung der hellen und dunklen Volltonfelder linear approximiert worden. Die Verteilung der Residuen in (2) und (3) um den Nullpunkt bei geringer Streuung bestätigt den linearen Zusammenhang.

In Abbildung 20 (1) sind in Rot die Ausgabewerte in Digital Counts (DC) für ein helles und in Grün für ein dunkles Volltonfeld des Grünkanals (G-Kanal) dargestellt. Der Ausgabewert kann dabei zwischen 0 und 255 liegen. Zwischen der Belichtungszeit (Eingangsgröße) und den Digital Counts (Ausgangsgröße) ist ein lineares Verhältnis abbildbar. Um dies zu bestätigen, ist eine lineare Approximation der Auftragung für die Messungen der hellen und dunklen Volltonfelder durchgeführt worden. In (2) und (3) sind die jeweiligen Residuen der Approximation über der Belichtungszeit aufgetragen. Durch die gleichmäßige Verteilung der Residuen um den Nullpunkt und die gleichzeitige geringe Streuung, wird der angenommene lineare Zusammenhang bestätigt. Dies gilt im unteren, wie im oberen Messbereich der Kamera. Somit ist diese Kamera aus der Sicht des Linearitätsanspruches für die Messung der Farbdichte geeignet.

3.2 Gegenüberstellung der Bedingungen in der Messwertaufnahme

Sämtliche Festlegungen in der DIN 16536 zielen darauf ab interinstrumentell vergleichbare Ergebnisse für Messungen der Farbdichte D erzeugen zu können [91]. Die Messwertaufnahme mit einem Druckinspektionssystem unterscheidet sich fundamental von den Forderungen nach DIN 16536. Diese Unterschiede werden in diesem Unterkapitel herausgearbeitet und dargestellt.

3.2.1 Spektrale Eigenschaften der Baugruppen

Die spektralen Eigenschaften von Beleuchtung und Detektionsfiltern sind essentiell für das Ergebnis einer Messung der Farbdichte. Aus diesem Grund wird nachfolgend ein Vergleich zwischen den Anforderungen und Definitionen nach DIN 16536 an eine Messung der Farbdichte und den spektralen Eigenschaften des verwendeten Druckinspektionssystems gezeigt.

Eingangsspektrum

Zur Beleuchtung der Messstelle des Druckinspektionssystems werden handelsübliche in Abbildung 21 dargestellte Leuchtstofflampen eingesetzt. Dabei können verschiedene Typen zum Einsatz kommen. Diese haben unterschiedliche Emissionsspektren. Damit können unterschiedliche Farbtemperaturen und Farbwiedergabeindizes realisiert werden [93].



Abbildung 21: Verschiedene Typen an Leuchtmitteln, die in der Beleuchtung des Druckinspektionssystems verwendet werden.

Nach DIN 16536 muss die Probe mit einer Beleuchtung, die der Normlichtart A entspricht, beleuchtet werden.

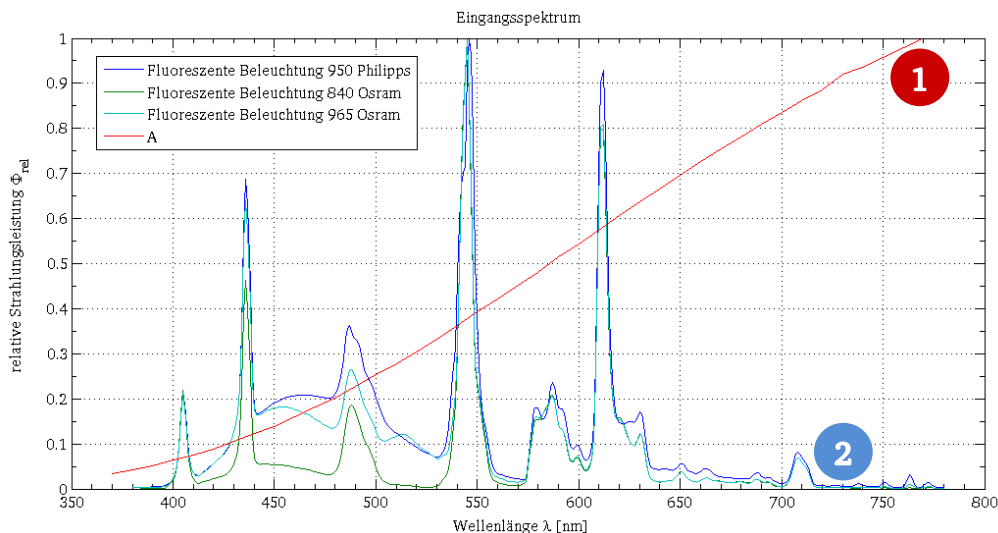


Abbildung 22: Rot (1) stellt die Verteilung der relativen Strahlungsleistung Φ_{rel} der Normlichtart A als Eingangsspektrum für eine Farbdichtemesung nach DIN 16536 dar. Die weiteren Verteilungen (2) der relativen Strahlungsleistung Φ_{rel} über der Wellenlänge λ entsprechen verschiedenen fluoreszierenden Leuchtmitteln, die in der Beleuchtung des Druckinspektionssystems eingesetzt werden.

In Abbildung 22 werden das geforderte Eingangsspektrum nach DIN 16536 und die Emissionsspektren verschiedener Leuchtmittel der Beleuchtung des Inspektionssystems dargestellt. Dabei ist in Rot (1) die Verteilung der relativen Strahlungsleistung Φ_{rel} über der Wellenlänge λ für die Normlichtart A aufgetragen. Φ_{rel} ist kontinuierlich über den sichtbaren Bereich der Wellenlänge λ verteilt. Die spektrale Verteilung hat eine niedrige Strahlungsleistung im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums. Sie steigt über den Bereich des sichtbaren Spektrums und erreicht das Maximum im langwelligen Bereich.

Die fluoreszierenden Beleuchtungen haben keine kontinuierliche Verteilung der relativen Strahlungsleistung über der Wellenlänge. Aus diesem Grund gibt es Bereiche, in denen keine Erregung stattfindet. Verglichen mit einer Beleuchtung entsprechend der Normlichtart A ändert sich das Reflexionsspektrum einer farbigen Probe deutlich. Damit muss sich ebenfalls die Farbdichte einer unter fluoreszierender Beleuchtung von einer unter Lichtart A durchgeführten Messung unterscheiden. Je nach Diskontinuität des Beleuchtungsspektrums könnte gar keine bzw. eine sehr geringe Erregung im Filterspektrum zur Messung der Farbdichte erfolgen.

Absorptionsfilter

Nach DIN 16536 ist für die Messung der Farbdichte eine Reflexionsmessung über definierte schmalbandige Absorptionsfilter vorgeschrieben. Dabei sind die Lage des Adsorptionsmaximums, sowie zwei Stützpunkte festgelegt. Lage und Form der Absorptionsfilter nach DIN 16536 sind in Abbildung 23 für die drei Druckfarben Cyan, Magenta und Gelb gestrichelt eingezeichnet. Der Absorptionsfilter, über den die Farbdichte der Druckfarbe Cyan gemessen wird, ist ein Rotfilter, für Magenta wird ein Grün- und für Gelb ein Blaufilter verwendet.

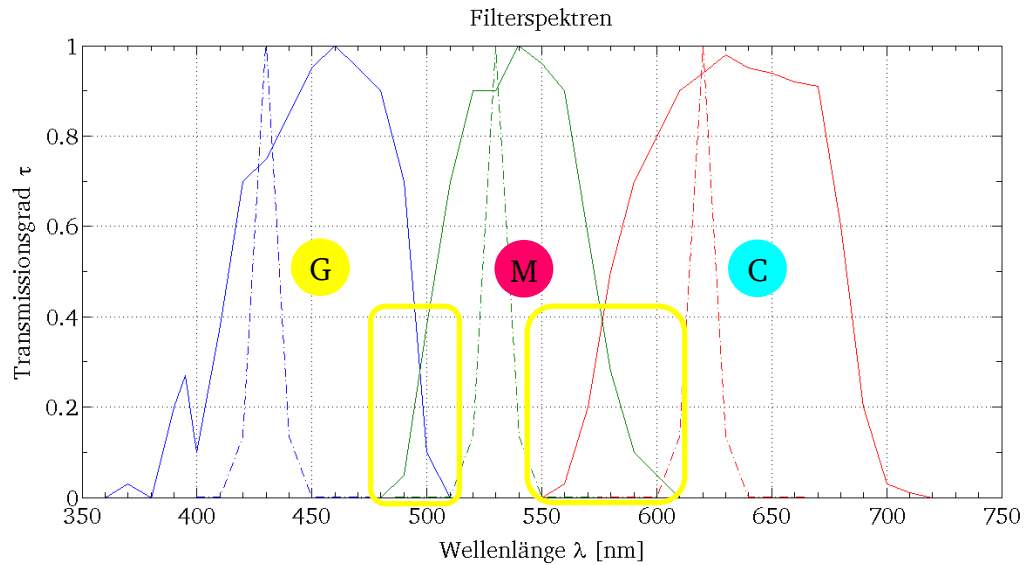


Abbildung 23: Filterspektren nach DIN 16536 (gestrichelte Linie) und der Kamera TVI XIIMUS (durchgehende Linie) des Druckinspektionssystems. Für Messungen der Farbdichte von Cyan wird ein Rotfilter, für Magenta ein Grünfilter und für Gelb ein Blaufilter verwendet. In Gelb sind die Kanalüberlappungen der RG- und GB-Kanäle eingezeichnet.

Die Eigenschaften der Absorptionsfilter der RGB-Kanäle der Kamera des Druckinspektionssystems unterscheiden sich deutlich von denen der nach DIN 16536 geforderten (vgl. Abbildung 23). Damit muss sich ebenfalls die gefiltert gemessene Intensität der Strahlungsleistung zwischen Normfiltern und verwendeten RGB-Kamerafilern unterscheiden. Weiter sind die breitbandigen Filterspektren der Kamera überlappend. Das kann zu Erregungen im, normativ gesehen, falschen Kanal der Kamera führen. Somit sind weitere Gründe für eine Unterscheidung der Farbdichte in Abhängigkeit von den verwendeten Filtern gegeben.

Gesamtsystem Kamera und Beleuchtung

In den vorangegangenen Abschnitten sind die optisch wirksamen Baugruppen der Emissions- und Detektionsseite getrennt spektral betrachtet worden. Beim realen Einsatz hingegen werden sie nicht getrennt verwendet. Im in dieser Arbeit verwendeten Druckinspektionssystem werden sowohl die fluoreszierende Beleuchtung ohne kontinuierliches Spektrum, als

auch die an das visuelle System angepassten breitbandigen Filter der Kamera eingesetzt.

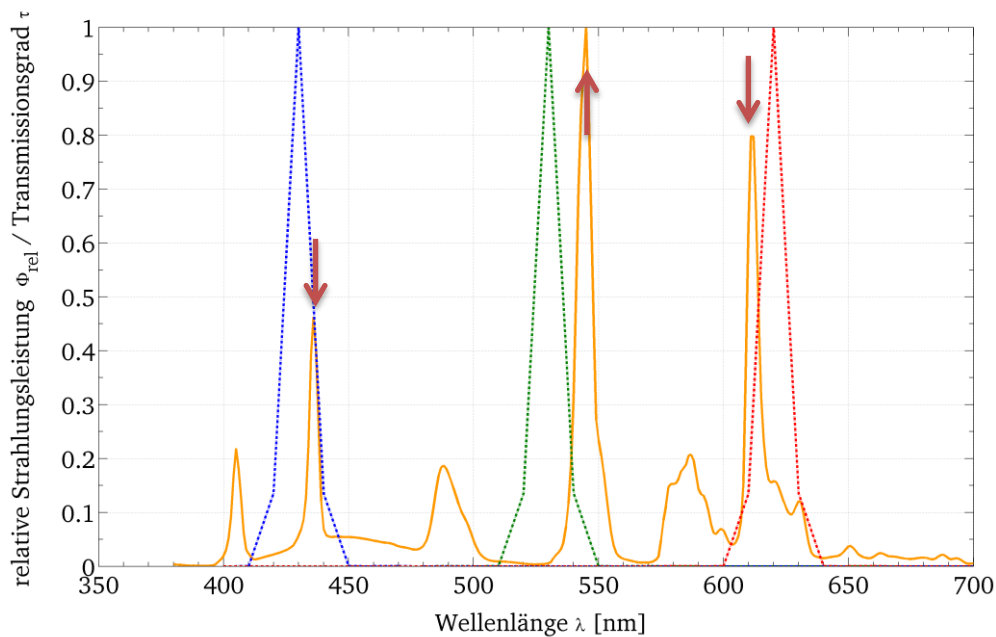


Abbildung 24: Lage der Absorptionsfilter nach DIN 16536 und der Peaks der fluoreszierenden Beleuchtung Osram 840 des Druckinspektionssystems. Die roten Pfeile zeigen die im Text erwähnten Haupterregungen der Inspektionsbeleuchtung.

In Abbildung 24 sind die schmalbandigen Absorptionsfilter nach DIN 16536 und das Emissionsspektrum der fluoreszierenden Beleuchtung Osram 840 des Druckinspektionssystems aufgetragen. Die Lage der Absorptionsfilter nach DIN 16536 ist auf $430 \pm 5 \text{ nm}$, $530 \pm 5 \text{ nm}$ und $620 \pm 5 \text{ nm}$ definiert. Die Bereiche der intensivsten Strahlungsleistung der Inspektionsbeleuchtung (Haupterregungen) liegen bei 435 nm, 546,1 nm und 613 nm. Es wird deutlich, dass die Lage der Absorptionsfilter nach DIN 16536 und der Haupterregungen für Blau- und Rotfilter im Rahmen der Toleranz kongruent sind. Die Position der Haupterregung bei 546,1 nm ist zwar relativ nahe, aber dennoch außerhalb der Toleranz der Lage der Normabsorptionsfilter.

Für eine Farbdichtemessung ist somit die fluoreszierende Beleuchtung des Inspektionssystems besser geeignet, als eine Beleuchtung durch einen Temperaturstrahler.

Der Wert der druckinspektionssystembasiert ermittelten Farbdichte D^*_{DIS} wird aus dem Reflexionsgrad β^*_{DIS} des gerätespezifisch gefilterten Signalwertes einer der RGB-Kanäle berechnet. Damit werden zum Teil Nebenerregungen der fluoreszierenden Beleuchtung ebenfalls in der Berechnung der Farbdichte D^*_{DIS} berücksichtigt.

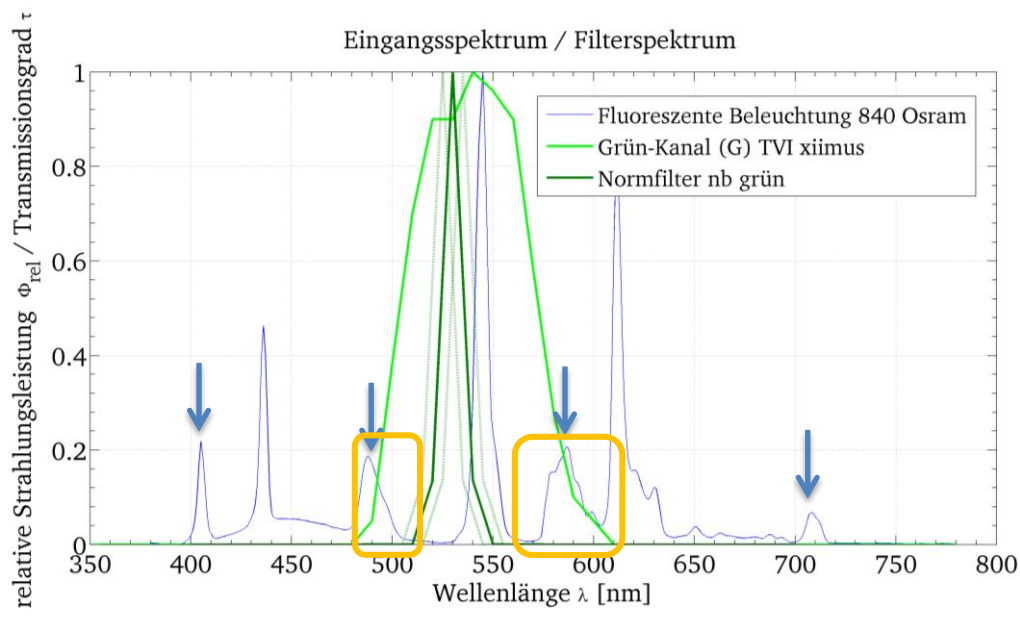


Abbildung 25: In der Bandbreite des Grün-Kanals der Kamera liegen die Nebenerregungen durch das fluoreszierende Eingangsspektrum. Die blauen Pfeile zeigen die weiteren Nebenerregungen der Beleuchtung. Gelb eingerahmt sind die in der Berechnung der Farbdichte D^*_{DIS} berücksichtigten Anteile der Nebenerregungen.

Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 25 dargestellt. Dort sind das Eingangsspektrum der fluoreszierenden Beleuchtung Osram 840, die spektrale Empfindlichkeit des Grünkanals und die spektrale Verteilung des Transmissionsgrades des normgerechten Absorptionsfilters aufgetragen. Die angesprochenen Nebenerregungen sind gelb eingerahmt. Sie liegen bei 490nm und 590nm und innerhalb der Filterbreite des Grün-Kanals der Kamera. Obwohl die Lage des Absorptionsfilters des Grün-Kanals der Kamera ähnlich zur Lage des schmalbandigen Absorptionsfilters nach DIN 16536 und des 540nm-Peaks der Beleuchtung des Inspektionssystems ist, werden durch die Filter des Grün-Kanals Erregungen detektiert, die unter normgerechten Bedingungen für eine Farbdichtemessung nicht be-

rücksichtigt werden. Dadurch werden bei einer Messung des gerätespezifisch über den Grünfilter der Kamera gefilterten Reflexionsgrad β^*_{DIS} nicht nur Reflexionen der Wellenlängen in dem Bereich des Peaks bei 540nm berücksichtigt.

Aus diesen Nebenerregungen, sowie aus der nicht perfekt ähnlichen Lage von Absorptionsfiltern nach DIN 16536 und Erregungspeaks der Inspektionsbeleuchtung müssen damit Unterschiede zwischen einer normkonform gemessenen Farbdichte D und einer per Inspektionseinrichtung gemessenen Farbdichte D^*_{DIS} resultieren.

3.2.2 Messgeometrie und Polarisationsrichtung

Messgeometrie

Nach DIN 16356 ist für eine Messung der Farbdichte eine $0^\circ/45^\circ$ - bzw. $45^\circ/0^\circ$ -Geometrie zu verwenden [35]. Dies ist auf der linken Hälfte von Abbildung 26 dargestellt und bedeutet, dass die Probe senkrecht beleuchtet und unter einem Winkel von 45° zur Beleuchtungsebene betrachtet wird bzw. umgekehrt. Dies wird damit begründet, dass diese Geometrie im Wesentlichen einer gewöhnlichen Betrachtung einer Druckprobe entspricht. Außerdem wird durch diese Geometrie die Möglichkeit einer direkten Oberflächenreflexion vermindert, da die Detektion in einem weit vom Ausfallswinkel entfernten Winkel erfolgt [6].

Die Messung der Farbdichte durch das Druckinspektionssystem erfordert eine vollkommen andere Messgeometrie, welche in der rechten Hälfte von Abbildung 26 dargestellt ist. Zum einen ist die verwendete Beleuchtung diffus abstrahlend. Das bedeutet, dass die Messstelle aus verschiedenen Richtungen beleuchtet wird.

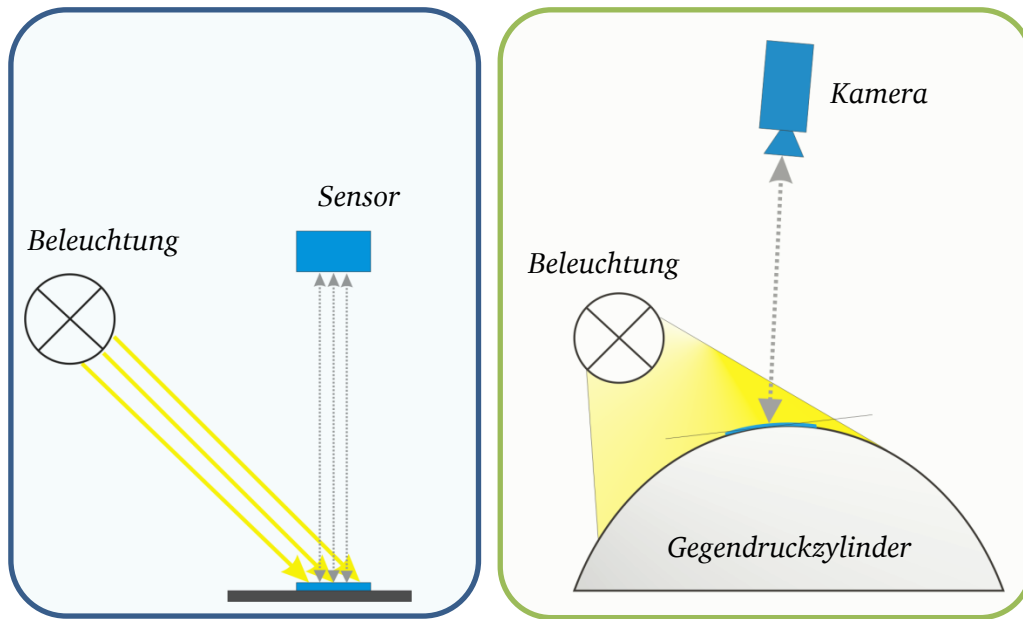


Abbildung 26: Links ist die Geometrie des Messaufbaus nach DIN 16536 dargestellt. Rechts ist der zylindrische Messuntergrund, die diffus strahlende Beleuchtung des Inspektionssystems sowie eine mögliche Fläche, zu der ein Detektionswinkel bestimmt werden kann zu sehen.

Weiter wird nicht nur die Messstelle, sondern ebenfalls das Umfeld angestrahlt. Gemessen wird direkt auf dem Gegendruckzylinder der Druckmaschine. Das bedeutet, dass auf einem zylindrisch geformten Untergrund gemessen wird. Wird die linienförmige Messfläche der Zeilenkamera wenige Millimeter verstellt, ändert sich ebenfalls der Winkel zur Tangente des Kreises, also der gedachten Messebene auf dem Zylinder. Im Allgemeinen wird die linienförmige Messfläche der Zeilenkamera des Inspektionssystems unabhängig irgendwelcher Winkel auf eine möglichst gute Bildwiedergabe eingestellt.

Polarisationseinrichtung

Wie in Abschnitt 2.3.3 erläutert, erfolgt nach DIN 16356 die Messung der Farbdichte durch eine in diesem Abschnitt erläuterte Polarisationseinrichtung (vgl. Abbildung 13). Die Wirkung von Polarisationseinrichtungen auf die Farbdichtemesung sowie die Optimierung der Messwertgenerierung durch diese Einrichtung wurde von CELIO und MAST 1991 veröffentlicht [21]. Ihrer Aussage nach ändert sich der Anteil an Oberflächenreflexionen in Abhängigkeit der Trocknungszeit. Durch eine generelle Minimierung der Oberflächenreflexion durch

die Polarisierungseinrichtung kann somit eine gleiche Farbdichte für trockene und druckfrische Farben gemessen werden.

Bei einer Messung der Farbdichte mittels Druckinspektionssystem wird systembedingt keine Polarisierungseinrichtung verwendet. Dies hat zwei Gründe. Zum einen ist der Anteil des oberflächenreflektierten Lichtes für die Grundaufgabe des Bildvergleiches irrelevant. Der Bildvergleich erfolgt immer relativ zu einem Referenzbild. Somit ist eine Aufnahme ohne Oberflächenreflexionen, bei der eventuell der Einsatz von Polarisationsfiltern sinnvoll wäre, nicht notwendig. Des Weiteren wird durch Polarisationsfilter die Lichtmenge, die zu der Kamera des Inspektionssystems gelangt so weit reduziert, dass die Belichtungszeiten stark heraufgesetzt werden müssen. Durch die hohe Produktionsgeschwindigkeit einer Druckmaschine und den daraus resultierenden kurzen Belichtungszeiten ist das jedoch nicht möglich.

Die durch ein Druckinspektionssystem bauartbedingten Randbedingungen der Messwertaufnahme auf einer gekrümmten Oberfläche sowie die sehr kleine Dimension in der Messfeldbreite wirken sich positiv auf eine Reduktion von Oberflächenreflexionen aus. Zum einen wird jedes einfallende Licht durch die zylindrische Form des Messuntergrundes divergent reflektiert. Das bedeutet, dass Oberflächenreflexionen weiter vom Detektor, also der Kamera, wegreflektiert werden, als auf einem ebenen Messuntergrund. Dies kann in Abbildung 27 dargestellt werden.

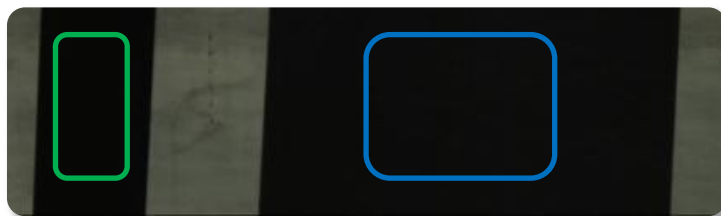


Abbildung 27: Ausschnitt einer Aufnahme des Druckinspektionssystems. Das linke schwarze Feld (grüner Rahmen) entspricht einem spiegelnden Untergrund, das rechte schwarze Feld (blauer Rahmen) einem schwarzen, hochglänzenden Untergrund. Die grauen Bereiche in der Abbildung entsprechen der Aufnahme des verchromten Gegen-druckzylinders.

Die schwarz dargestellten Flächen (grüner und blauer Rahmen) entsprechen Aufnahmen von hochglänzenden Proben. Da durch die Ausrichtung der Kamera kein direktreflektiertes Licht gelangen kann, werden diese Flächen schwarz dargestellt. Zum anderen beträgt die native Höhe des Messfeldes nur etwa 0,1mm. In Kombination mit der zylindrischen Messfläche ist somit die Fläche, von der oberflächenreflektiertes Licht in Richtung der Kamera abgestrahlt wird, sehr klein.

3.2.3 Messunterlage

Papier als Bedruckstoff ist im Allgemeinen nicht so opak, dass die Beschaffenheit des Untergrundes bei einer optischen Messung keinen Einfluss hat. Aus diesem Grund werden Messungen der Farbdichte entweder auf einem Stapel von mindestens fünf Bogen desselben Bedruckstoffes wie des Druckes gemessen, oder es wird eine matt schwarze Unterlage gewählt [6, 9, 34, 45]. Die Verwendung des Bedruckstoffstapels hat den Vorteil, dass ein leicht verfügbarer einheitlicher Untergrund für die Messung verwendet werden kann. Durch Verwendung einer matt schwarzen Unterlage kann der Einfluss eines Druckbildes der Rückseite verhindert werden. Beide Varianten sind in der Drucktechnik etabliert. Die Ergebnisse sind allerdings nicht vergleich- oder übertragbar und somit muss die verwendete Messunterlage zum Messergebnis mit angegeben werden.

Messungen der Farbdichte mittels eines Druckinspektionssystems erfolgen immer direkt in der Druckmaschine. Der Bogen muss während der Bildaufnahme in alle Dimensionen stabil geführt werden. Da für eine Bogeninspektion keine zusätzlichen Bauteile für eine gesonderte Bogenführung eingebaut werden, erfolgt die Bildaufnahme direkt auf dem Gegendruckzylinder. Dies bedeutet, dass eine Messung der Farbdichte mittels Druckinspektionssystem auf einem verchromten, je nach Hersteller leicht rauen, Untergrund erfolgt. Diese Messunterlage entspricht somit keiner der beiden etablierten Varianten.

3.2.4 Messfeldgröße

Nach DIN 16356 ist die Größe des Messfeldes für eine Messung der Farbdichte festgelegt [35]. Die Mindestgröße ist in Abhängigkeit des gedruckten Rasters zu bestimmen. Dabei muss der Flächeninhalt A die Bedingung aus Gleichung 3.2 erfüllen:

$$A \geq \frac{256}{R^2} \quad 3.2$$

Dabei entspricht R der Rasterfrequenz in mm^{-1} und A dem Flächeninhalt des Messfeldes in mm^2 . Bei einer angenommenen Rasterfrequenz von $60/\text{cm}$ muss demnach die Messfläche mindestens $7,1\text{mm}^2$ Flächeninhalt haben. Das entspricht für eine kreisförmige Messfläche einem Mindestdurchmesser von 3mm .

Wie in Abschnitt 3.1.1 dargestellt, kann die Größe des Messfeldes bei der Messung durch das Druckinspektionssystem vollkommen frei skaliert werden. Das bedeutet, dass über die Pixel eines Bildausschnittes, also der nativen Messfeldgröße, ein Mittelwert für eine Farbdichteberechnung gebildet wird. Somit kann zum einen die nach DIN 16536 geforderte Messfeldgröße eingehalten werden, zum anderen das Messfeld an die reale Größe anderer Messgeräte der Farbdichte angepasst werden.

3.3 Quantitativer Einfluss auf die Farbdichte D^*_{DIS}

Im vorangegangenen Unterkapitel wurden bisher die Unterschiede zwischen dem normgerechten Messaufbau und einer Messung der Farbdichte per Druckinspektionssystem gezeigt. In diesem Unterkapitel werden die quantitativen Einflüsse dieser Unterschiede hinsichtlich Absorptionsfilter, Beleuchtung und Polarisationsrichtung untersucht und dargestellt.

3.3.1 Filter und Beleuchtung

Um den quantitativen Einfluss der spektralen Eigenschaften von Filtern und Beleuchtung auf eine Berechnung der Farbdichte zu zeigen, sind Proben mit einem Spektralphotometer, welches mit einer Polarisierungseinrichtung ausgestattet ist, vermessen worden [114]. Dabei wurde das jeweilige Reflexionsspektrum der Proben für die Druckfarbe Cyan (C), Magenta (M) und Gelb (Y) bei unterschiedlichen Farbdichten gemessen. Mit Gleichung 2.5 aus der Definition der Farbdichte in Abschnitt 2.3.2 kann aus dem Reflexionsgrad β der Proben, sowie den spektralen Verteilungsfunktionen S_i der optischen Bauteile des Druckinspektionssystems und einer normkonformen Messung jeweils eine Farbdichte berechnet werden.

In Abbildung 28 ist die normgerecht bestimmte Farbdichte D über Farbdichte D^*_{DIS} , die aus einem Eingangsspektrum entsprechend der fluoreszierenden Beleuchtung des DIS und Absorptionsfiltern entsprechend der im DIS eingesetzten Kamera TVI XIIMUS berechnet wurde, aufgetragen.

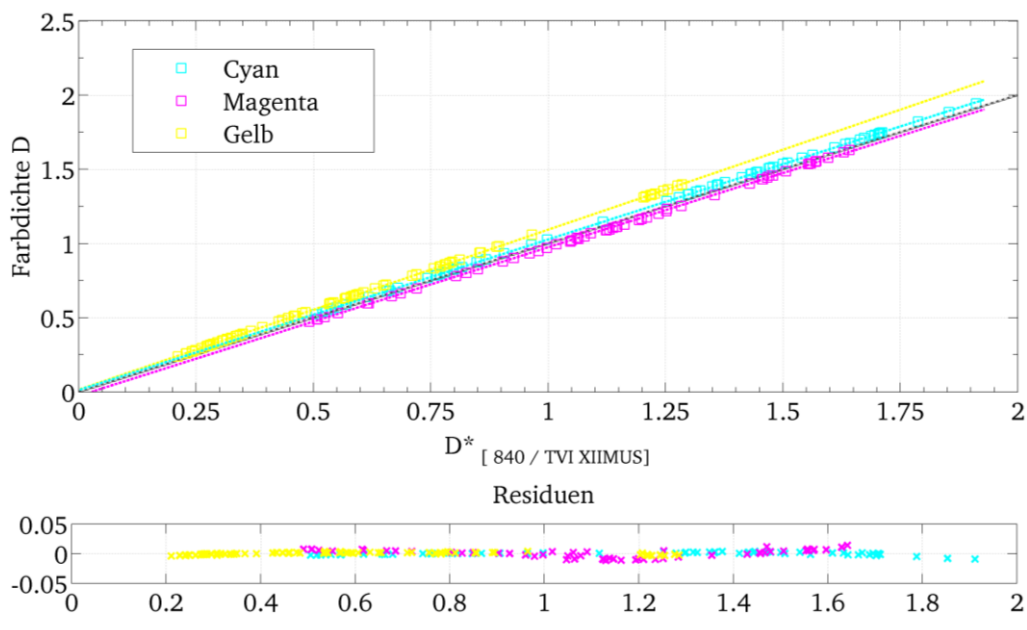


Abbildung 28: Farbdichte D über der berechneten Farbdichte D^* , die auf einem Eingangsspektrum einer fluoreszierenden Beleuchtung 840 des DIS und Absorptionsfiltern entsprechend der Kameraeigenschaften des DIS beruhen.

Der Einfluss der abweichenden spektralen Charakteristiken von Filter und Beleuchtung, die bei einer Messung durch das Druckinspektionssystem verwendet werden, kann mittels eines linearen Ansatzes mit einem Parameter δ beschrieben werden. In Gleichung 3.3 ist eine Transformationsfunktion beschrieben, mit der $D^*_{[840 / XIIMUS]}$ in eine normäquivalente Farbdichte $D_{D^*840/XIIMUS \Leftrightarrow D}$ umgerechnet werden kann.

$$D_{D^*840 / XIIMUS \Leftrightarrow D} = D^*_{840 / XIIMUS} \cdot \delta \quad 3.3$$

Die berechneten Größen für δ sind in Tabelle 1 zusammengefasst, wobei δ druckfarbenabhängig ist.

Tabelle 1: *Ergebnisse aus der linearen Approximation für die Korrekturterme δ für die Druckfarben CMY.*

	Cyan (C)	Magenta (M)	Gelb (Y)
δ	1,024	0,979	1,098

Der Einfluss auf die Farbdichte der Druckfarbe Gelb (gemessen über den Blaukanal) ist am größten. Dies kann durch die Nebenerregungen erklärt werden. Bei einer Messung durch das Druckinspektionssystem für die Druckfarbe Gelb wird vergleichsweise der größte Anteil an Nebenerregungen mitgemessen. Für die Druckfarbe Magenta ist $D^*_{[840 / XIIMUS]}$ kleiner, als die normgerecht bestimmte Farbdichte D . Dies ist auf die Lage der für eine Messung der Farbdichte Magenta verwendete Haupterregung bei 542nm zurückzuführen. Die definierte Lage des Absorptionsfilters nach DIN 16536 bei $530 \pm 5\text{nm}$ soll eigentlich dem Absorptionsmaximum der Druckfarbe Magenta entsprechen. Wie in Abbildung 29 zu sehen, liegt das Absorptionsmaximum real jedoch bei 570nm. Da die Erregung der fluoreszierenden Beleuchtung in Richtung des realen Absorptionsmaximums verschoben ist, muss die daraus berechnete Farbdichte kleiner als die Normfarbdichte sein.

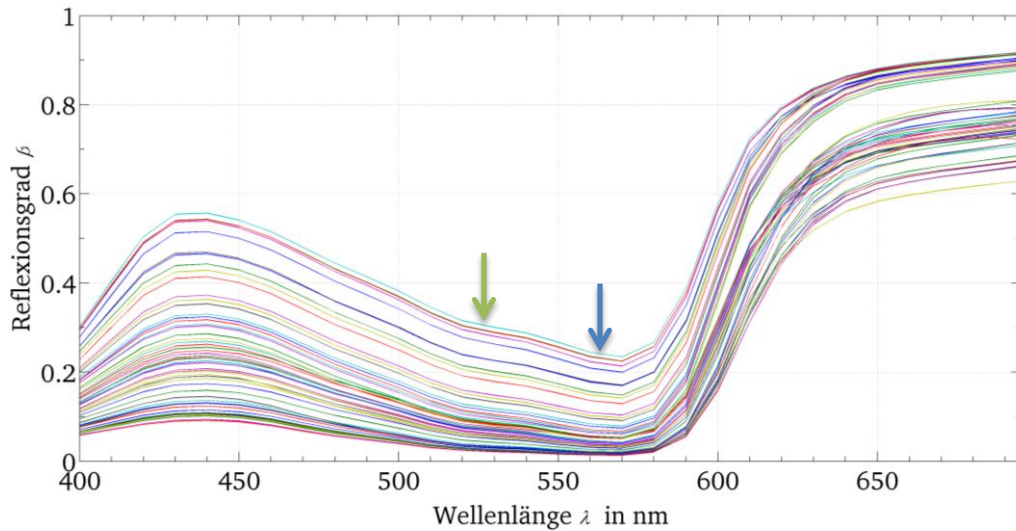


Abbildung 29: Gemessene Reflexionsspektren der Druckfarbe Magenta für verschiedene gedruckte Schichtdicken. Aufgetragen ist der Reflexionsgrad β einer gedruckten Schichtdicke über der Wellenlänge λ . Das Absorptionsmaximum liegt bei 570nm (blauer Pfeil). Die Lage des Absorptionsfilter nach DIN bei 530nm (grüner Pfeil).

Generell haben die mitgemessenen Nebenerregungen einen größeren Einfluss auf die Berechnung der Farbdichte als die Lage der Haupterregung. Aus diesem Grund wird für die Beleuchtung des Inspektionssystems ein möglichst diskontinuierliches Spektrum ohne Nebenerregungen verwendet.

3.3.2 Polarisations-einrichtung

Nach DIN 16536 sollte unbedingt eine Polarisations-einrichtung verwendet werden, wenn das Ergebnis der Messung der Farbdichte zur Steuerung der Druckmaschine verwendet wird. Dies wird damit begründet, dass nur so die Vergleichbarkeit von Messungen an anderen Stellen in der Produktion gegeben ist. Fest vorgeschrieben ist die Verwendung jedoch nicht [36].

Um den quantitativen Einfluss der nach DIN 16536 empfohlenen Polarisations-einrichtung auf eine Berechnung der Farbdichte zu zeigen, wurden Proben mit einem Spektralphotometer vermessen, das das Reflexionsspektrum mit und ohne Polarisations-einrichtung messen kann. Als Proben sind getrocknete Drucke der Druckfarben Cyan (C), Magenta (M) und Gelb (Y) unterschiedlicher Farbdichten verwendet wor-

den. Aus dem jeweiligen Reflexionsgrad β und den spektralen Verteilungsfunktionen S_i der optischen Bauteile des Druckinspektionssystems 2.2.3 und einer normkonformen Messung aus Abschnitt 2.3.3 kann mit Gleichung 2.5 aus der Definition der Farbdichte in Abschnitt 2.3.2 die entsprechende Farbdichte berechnet werden. Berechnet wurde die normgerecht ermittelte Farbdichte D mit Polarisationsrichtung und eine Farbdichte D^* , die auf einem Eingangsspektrum einer fluoreszierenden Beleuchtung 840, Absorptionsfiltern entsprechend der spektralen Charakteristik der Kamera TVI XIIMUS und ohne den Einsatz von Polarisationsrichtung beruht. Anschließend wird D gegen D^* in Abbildung 30 aufgetragen.

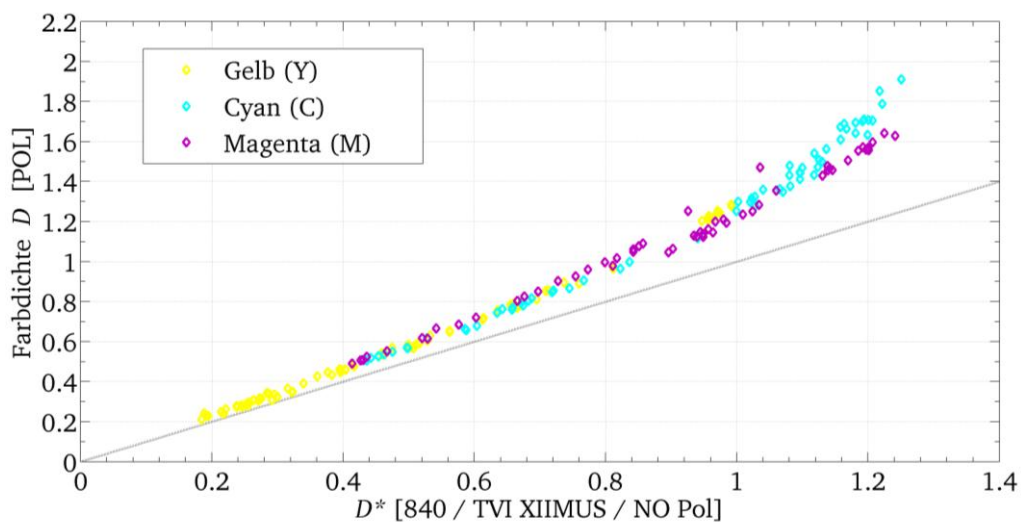


Abbildung 30: Einfluss einer Polarisationsrichtung auf die Messung der Farbdichte der Druckfarben CMY. Aufgetragen ist die berechnete Farbdichte D , gemessen mit Polarisationsrichtung, über der berechneten Farbdichte D^* , gemessen ohne Polarisationsrichtung. Sämtliche Messungen erfolgten mit dem SpectroDens von Techkon [114].

In Abbildung 30 ist zu erkennen, dass sich die berechneten Farbdichten D und D^* deutlicher unterscheiden, als die bestimmten Farbdichten aus Abschnitt 3.3.1, welche in beiden Fällen aus Messungen mit einer Polarisationsrichtung berechnet wurden. Zudem ist der Zusammenhang, insbesondere für größere Farbdichten, nicht linear. Aus Literaturangaben ist bekannt, dass eine Farbdichte, die mittels einer Polarisationsrichtung gemessen worden ist, generell größer ist, als eine,

welche ohne eine solche Einrichtung gemessen wurde [21, 36, 61, 85, 91]. Dies ist durch die Wirkungsweise der Polarisations-einrichtung erklärbar, die den Anteil der oberflächenreflektierter Reflexion unterbindet (vgl. Abschnitt 2.3.3). Um den Einfluss der Oberflächenreflexionsreduktion auf das Ergebnis einer Messung, aus der eine Farbdichte berechnet wird, besser nachvollziehen zu können, ist in Abbildung 31 das Reflexionsverhalten einer Druckfarbe auf einem Bedruckstoff gezeigt.

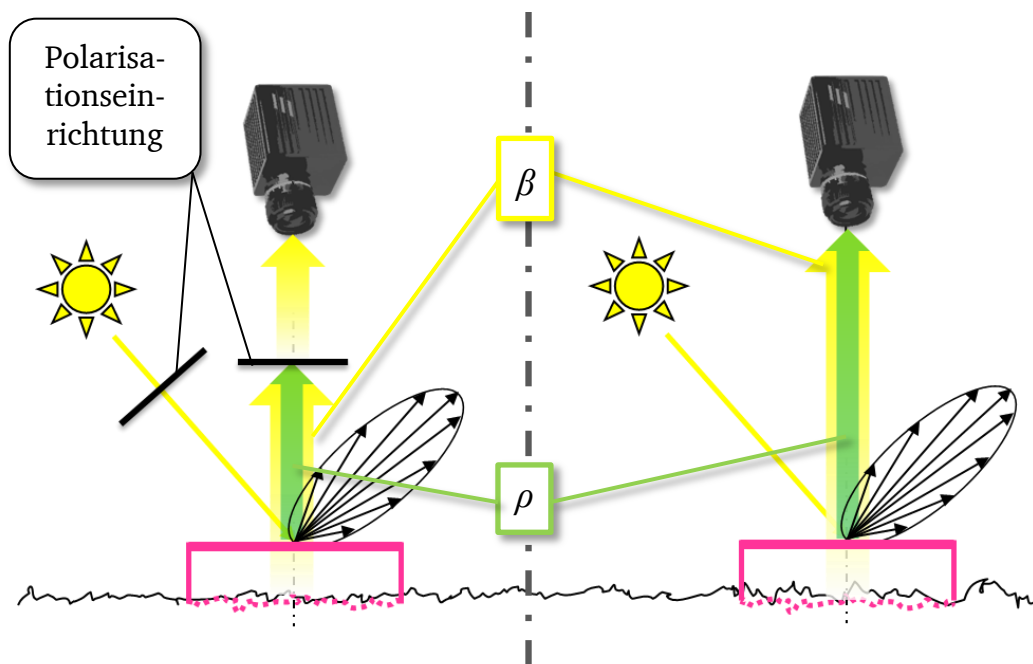


Abbildung 31: Oberflächenreflexionseigenschaften einer Druckfarbe. In der linken Hälfte ist die Messwerterfassung mit Polarisations-einrichtung dargestellt. In der rechten Hälfte ohne eine solche Einrichtung. Neben der Gesamtreflexion β in Richtung der Kamera, gibt es einen Anteil an oberflächenreflektierter Strahlung ρ , die durch eine Polfilter-einrichtung unterbunden werden kann.

In der linken Hälfte ist eine Messanordnung mit einer Polarisations-einrichtung dargestellt. Die Probe wird unter 45° zur Messebene beleuchtet und die Gesamtreflexion wird als Reflexionsgrad β unter 0° mit der Kamera detektiert. Durch eine raue Oberfläche wird ein Teil ρ des eingehenden Lichtes an der Oberfläche diffus in Richtung der Kamera reflektiert. Durch die Polarisations-einrichtung wird verhindert, dass dieser Teil von der Kamera detektiert wird. Damit wird der Teil der Oberflächenreflexion von der Gesamtreflexion subtrahiert.

In der rechten Hälfte ist dieselbe Messanordnung ohne Polarisations-einrichtung abgebildet. Hier wird von der Kamera die Gesamtreflexion als Reflexionsgrad β und ebenfalls die Oberflächenreflexion ρ detektiert. Da die Farbdichte aus dem negativen Logarithmus der detektierten Reflexion berechnet wird (vgl. Abschnitt 2.3.2), muss folglich die Farbdichte, die aus einer Messung mit Polarisations-einrichtung berechnet wird, kleiner sein, als eine Farbdichte, die aus einer Messung ohne Polarisations-einrichtung berechnet wird.

Die Differenz aus dem gewichteten Reflexionsgrad β_D und dem Anteil der Oberflächenreflexion ρ (grüner Pfeil in Abbildung 31) entspricht dem Reflexionsgrad, der mit einer Polarisations-einrichtung gemessen wird. Unter dem gewichteten Reflexionsgrad β_D wird die Gewichtung des Reflexionsgrads mit dem Eingangs- und Absorptionsspektrum, welches einer Farbdichteberechnung zu Grunde gelegt ist.

$$\beta_D = \frac{\sum \beta_{Probe} \cdot S_{Licht} \cdot S_{Filter}}{\sum S_{Licht} \cdot S_{Filter}} \quad 3.4$$

Für eine Berechnung der Farbdichte kann dies auch durch den Zusammenhang in Gleichung 3.5 ausgedrückt werden.

$$D = \log \frac{\beta_{D,0} - \rho_0}{\beta_D - \rho} \quad 3.5$$

Das bedeutet, dass die Farbdichte, die aus Messungen mit einem Polarisationsfilter berechnet wird, sich aus der Differenz von gewichtetem Reflexionsgrad β_D und dem Anteil an Oberflächenreflexion ρ berechnen lässt. Nach der Herleitung in Abschnitt 2.3.2 ist die Farbdichte ein Ausdruck für die Absorptionsfähigkeit der zu betrachtenden Farbschicht. Das bedeutet weiter, dass für eine korrekte Berechnung der Farbdichte keine Oberflächenreflexionen berücksichtigt werden dürfen.

Kann keine Polarisations-einrichtung zur Unterdrückung der Oberflächenreflexion verwendet werden, muss eine andere Möglichkeit gefunden werden, den Anteil der Oberflächenreflexion zu bestimmen. Eine Möglichkeit ist die Berechnung

über die FRESNELSCHEN Gleichungen 3.6. Hierbei kann der Anteil der Oberflächenreflexion ρ mit Kenntnis der Brechungsindizes n_i der beteiligten Materialien und in Abhängigkeit vom Einfallswinkel ε bestimmt werden [40, 49, 124, 125, 128]. ρ_{\parallel} ist die polarisierte Oberflächenreflexion in der Ebene des elektrischen Vektors und ρ_{\perp} die polarisierte Oberflächenreflexion in der Ebene senkrecht zur Einfallsebene.

$$\rho = \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2}$$

$$\rho_{\parallel} = \left\{ \frac{\cos \varepsilon - \sqrt{\left[\left(n_2/n_1 \right)^2 - \sin^2 \varepsilon \right]}}{\cos \varepsilon + \sqrt{\left[\left(n_2/n_1 \right)^2 - \sin^2 \varepsilon \right]}} \right\}^2$$

$$\rho_{\perp} = \left\{ \frac{\left(n_2/n_1 \right)^2 \cdot \cos \varepsilon - \sqrt{\left[\left(n_2/n_1 \right)^2 - \sin^2 \varepsilon \right]}}{\left(n_2/n_1 \right)^2 \cdot \cos \varepsilon + \sqrt{\left[\left(n_2/n_1 \right)^2 - \sin^2 \varepsilon \right]}} \right\}^2$$
3.6

Dies setzt jedoch erstens eine genaue Kenntnis der Brechungsindizes voraus. Weiter ist eine einfache Berechnung nur für den Fall möglich, dass das Licht unter einem Winkel ε einfällt. Das gilt allerdings nur für den Fall einer gerichteten Beleuchtung. Für ideal diffus einfallendes Licht wurden von JUDD Lösungen für die anteiligen Reflexionen basierend auf den FRESNELSCHEN Gleichungen veröffentlicht [71]. Basierend auf diesen Zusammenhängen hat SAUNDERSON eine Korrektur für die Oberflächenreflexion 1942 veröffentlicht [106]. Im realen Anwendungsfall der Praxis, insbesondere bei der Beleuchtungssituation des Druckinspektionssystems, kann weder von dem einen, noch von dem anderen Spezialfall ausgegangen werden. Es tritt eine Mischung aus perfekt gerichteter und

ideal diffuser Beleuchtung auf. Somit kann auf diese Weise nicht der Teil an oberflächenreflektierter Reflexion ρ bestimmt werden.

Es ist jedoch möglich, aus den für die Untersuchung des quantitativen Einflusses erstellten Messwerten, auf den Anteil der Oberflächenreflexion ρ zu schließen, den die Polarisationsrichtung absorbiert (vgl. Abbildung 30). In Gleichung 3.5 wurde gezeigt, dass die Wirkungsweise der Polarisationsrichtung als Differenz aus gewichtetem Reflexionsgrad β_D und Oberflächenreflexion beschrieben werden kann. Da für dieselben Proben Reflexionsspektren mit und ohne Polarisationsrichtung gemessen wurden, kann, unter der Annahme, dass die Beschreibung nach Gleichung 3.5 umfassend ist (also keine weiteren Effekte auftreten), aus den Differenzen der Farbdichten $D_{1...k}$, die aus Messungen mit Polarisationsfilter (= ohne Oberflächenreflexion) bestimmt wurden, und den gewichteten Reflexionsgraden $\beta_{D0;1...k}$ und $\beta_{D;1...k}$, welche auf Messungen ohne Polarisationsrichtung basieren, der Anteil der Oberflächenreflexionen bestimmt werden.

Dazu wird numerisch ein Wert für den Anteil der Oberflächenreflexion ρ_0 des Bedruckstoffes und der Druckfarbe ρ bestimmt. Aus Gleichung 3.5 wird als Ansatzfunktion Gleichung 3.7 abgeleitet. Dabei werden für $D_{1...k}$ die Ergebnisse der Farbdichteberechnung mit Polfilter, für $\beta_{D0;1...k}$ die gewichteten Reflexionsgrade für den Bedruckstoff und für $\beta_{D;1...k}$ die gewichteten Reflexionsgrade der Druckfarbe eingesetzt.

$$RMSE_{min} = D_{1...k} - \log \frac{\beta_{D0;1...k} - \rho_0}{\beta_{D;1...k} - \rho} \quad 3.7$$

Ziel ist es Werte für die Parameter ρ_0 und ρ zu finden, die für die Differenzen der gemessenen Farbdichten $D_{1...k}$ und der Farbdichte $D^*_{1...k}$ die Summe der Fehlerquadrate RMSE minimiert.

Obwohl es der Vorstellung entspricht, dass die Oberflächen von Bedruckstoff und Druckfarbe, zumindest bei Volltonfeldern, die den Bedruckstoff vollflächig bedecken, unterschied-

lich sein sollten, haben Untersuchungen der Oberfläche gezeigt, dass dies nicht der Fall ist. In Abbildung 32 ist das Profil einer Kante eines Volltonfeldes auf einem rauen Bedruckstoff dargestellt. Erstellt wurde die Messung des Oberflächenprofils mit einem konfokal arbeitenden Messsystem PLu neox des Herstellers SENSOFAR [110]. Es ist zu erkennen, dass die Profilierung innerhalb der bedruckten Fläche (rechts der Markierung) ähnlich des unbedruckten Bereiches links der Markierung. Dasselbe Verhältnis des Profils zwischen bedruckten und unbedruckten Bereichen konnte für glatte Bedruckstoffe dargestellt werden.

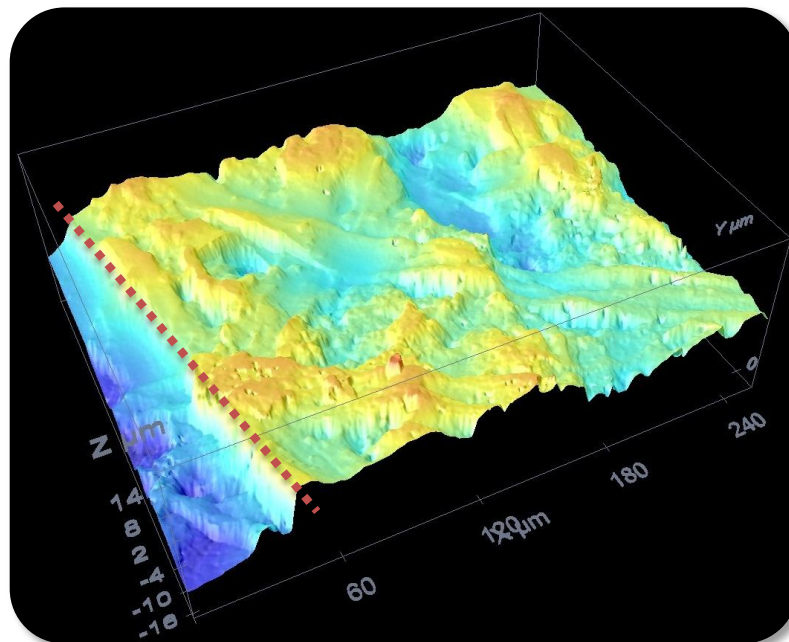


Abbildung 32: Profilaufnahme eines rauen Bedruckstoffes. Abgebildet ist die Kante einer gedruckten Volltonfläche. Die Kante verläuft entlang des rot markierten Bereiches. Die Oberflächenrauheit des Bedruckten Bereiches ist nicht kleiner, als die des unbedruckten Bereiches (Messwerte wurden mit dem PLu neox der Firma Sensofar gemessen [110]).

Weiter haben Lösungen dieses Ansatzes aus Gleichung 3.7 gezeigt, dass eine Unterscheidung der Anteile, welche auf dem Bedruckstoff und auf der Druckfarbe an der Oberfläche reflektiert werden, keine Vorteile in der Präzision der Lösung bringen. Aus diesem Grund wird angenommen, dass der Parameter ρ für Farb- und Bedruckstoffoberfläche gleich ist. Aus dieser Annahme folgt Gleichung 3.8

$$RMSE_{min} = D_{1...k} - \log \frac{\beta_{D0;1...k} - \rho}{\beta_{D;1...k} - \rho} \quad 3.8$$

Ist ein physikalisch sinnvoller Wert für den Oberflächenreflexionsanteil in Form des Parameters ρ bestimmbar, kann hiermit die Messung ohne Polarisationsfiltereinrichtung so korrigiert werden, dass die Ergebnisse einer Messung mit Polfiltereinrichtung entsprechen.

Gelöst wurde der Ansatz aus Gleichung 3.8 mit der Funktion *fminsearch* der Software MATLAB des Herstellers The MathWorks. *fminsearch* ist eine Funktion, die ohne die Möglichkeit von Constrains ein definierbares Minimierungskriterium einer Funktion bestimmt. Das zu bestimmende Kriterium aus Gleichung 3.8 war die Wurzel der Summe der Fehlerquadrate RMSE. In Abbildung 33 ist ein Ergebnis für den Parameter ρ gezeigt. Dazu wurde in Grün das Ergebnis der Farbdichte D einer Messung mit Polarisationsseinrichtung über dem Ergebnis der Farbdichte D_{NP} einer Messung ohne Polarisationsseinrichtung aufgetragen.

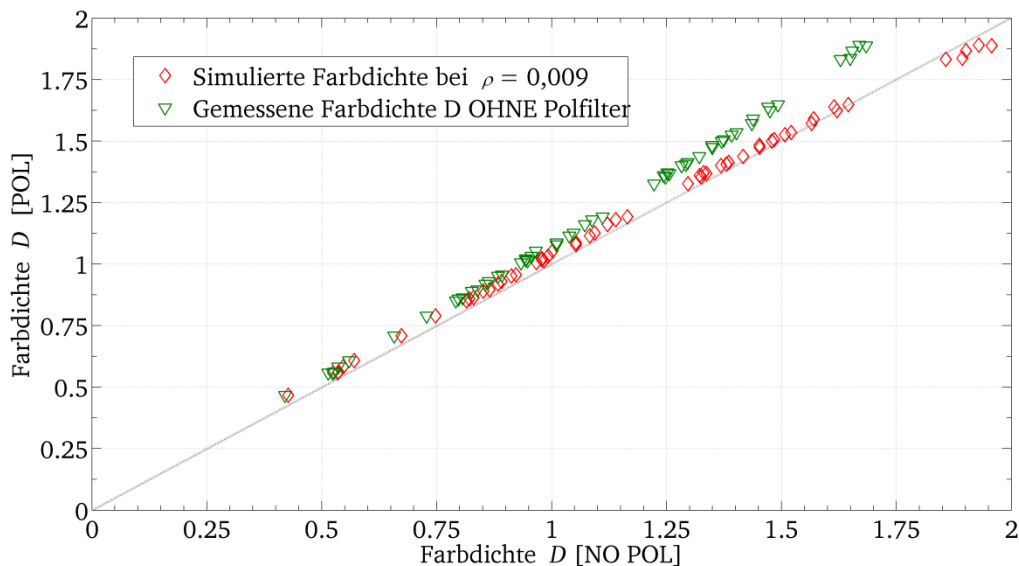


Abbildung 33: In Grün sind die Werte einer Messung der Farbdichte D mit Polfiltereinrichtung über Werten der Farbdichte D_{NP} ohne Polfiltereinrichtung aufgetragen. In rot ist das Ergebnis dieser Auftragung nach einer Korrektur mittels des Parameters ρ (= Anteil Oberflächenreflexion) aufgetragen (Messwerte wurden mit dem SpectroDens der Firma Techkon gemessen [114]).

Aus der Berechnung mit dem Ansatz aus Gleichung 3.8 wurde ein Wert $\rho = 0,009$ für den Anteil der Oberflächenreflexion bestimmt. Mit diesem Wert und Gleichung 3.5 wird die Farbdichte der Messungen ohne Polarisationsfilter erneut berechnet und gegen die Messungen der Farbdichte, die mit Polarisationsfilter gemessen wurden, in Abbildung 33 aufgetragen. Es wird deutlich, dass der gefundene Wert für ρ den Einfluss der Polarisationsrichtung gut beschreibt, da diese Auftragung auf der Winkelhalbierenden liegt.

Nachdem gezeigt wurde, dass aus spektralphotometrischen Messungen der Anteil der Oberflächenreflexion bestimmt werden kann, soll nun der Einfluss unterschiedlicher Bedruckstoffe dargestellt werden. Bedruckstoffe unterscheiden sich unter anderem im Profil der Oberfläche. Es wurde bereits angeführt, dass der Unterschied der Oberfläche der Druckfarbe und des Bedruckstoffes nicht eindeutig trennbar ist. Ändert sich also die Oberfläche des Bedruckstoffes, so ändert sich in gleicherweise die Oberfläche der gedruckten Farbe. Dies gilt soweit nur für die in dieser Arbeit verwendeten Materialkombinationen. Eine allgemeine Übertragbarkeit kann aus den profilometrischen Untersuchungen nicht abgeleitet werden. Tritt eine Änderung des Profils der Oberfläche auf, muss damit ebenfalls das Oberflächenreflexionsverhalten in Abhängigkeit der Profiländerung verschieden sein.

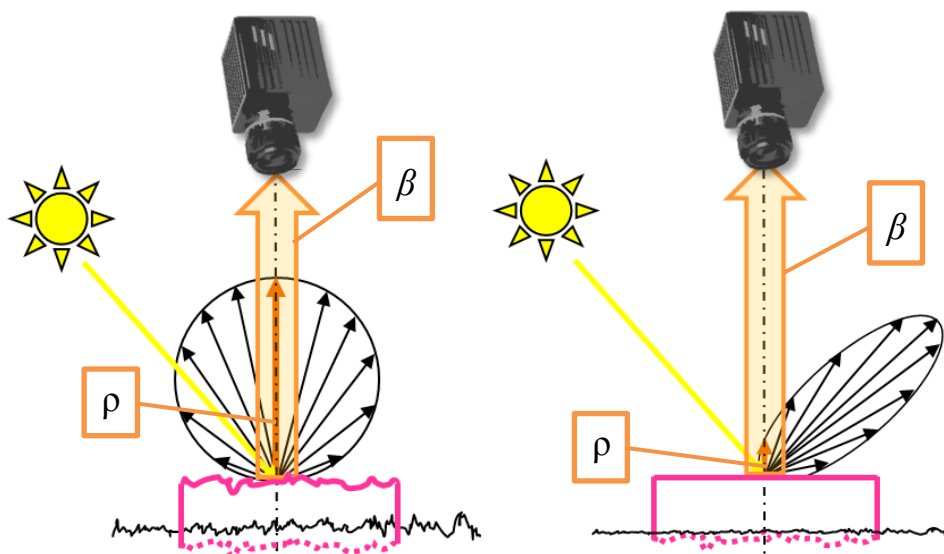


Abbildung 34: Oberflächenreflexion ρ in Abhängigkeit von der Bedruckstoffrauigkeit bei einer gerichteten Beleuchtung.

In Abbildung 34 ist auf der linken Hälfte das Reflexionsverhalten einer rauen Oberfläche dargestellt. An rauen Oberflächen entspricht die Reflexion einem LAMBERT-Reflektor, der ideal diffus reflektiert [128]. Durch die diffuse Reflexion, kann ein großer Teil der Oberflächenreflexion in Richtung der Kamera reflektiert werden. In der rechten Hälfte sind eine glatte Oberfläche und das zugehörige Reflexionsverhalten dargestellt. Durch die glatte Oberfläche geht die diffuse in eine gerichtete Reflexion über. Deshalb wird der Anteil an oberflächenreflektierter Reflexion in Richtung der Kamera klein gegenüber einer rauen Oberfläche.

Da der Anteil der in Richtung der Kamera reflektierten Oberflächenreflexion abhängig von der Rauigkeit der Oberfläche ist, muss der Einfluss einer Polarisationseinrichtung, die diesen Anteil absorbieren kann, auf das Messergebnis zwischen verschiedenen Bedruckstoffen differieren. Als Nachweis wurden Messungen der Reflexionsspektren auf bedruckten glatten und rauen Bedruckstoffen durchgeführt. In Abbildung 35 ist einmal die Farbdichte D , welche mit Polarisationsfilter gemessen wurde, über der Farbdichte D_{NP} , die ohne eine Polarisationsrichtung gemessen wurde, aufgetragen.

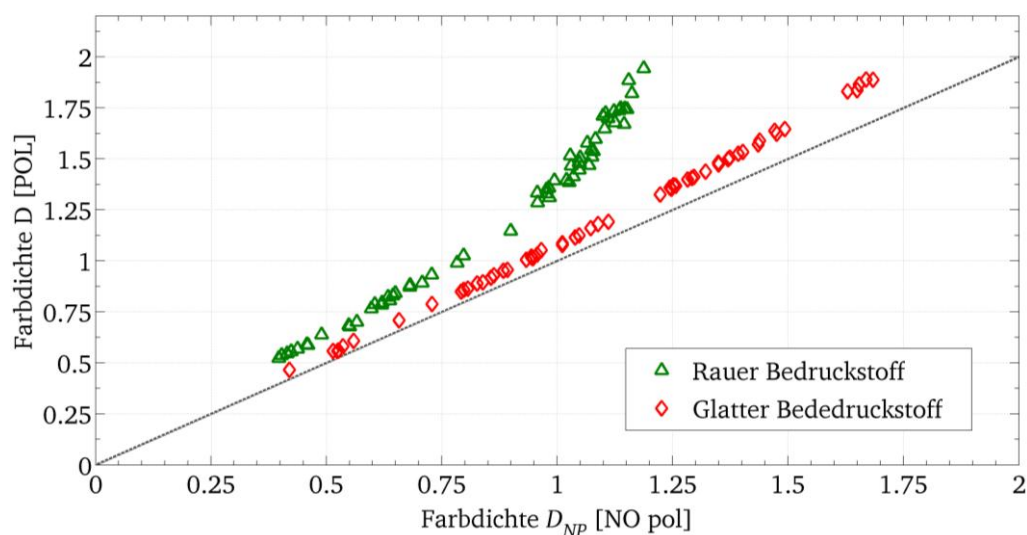


Abbildung 35: Normgerechte Farbdichte D (mit Polarisationsfilter) über normgerechter Farbdichte D (ohne Polarisationsfilter). Dieser Zusammenhang wird einmal für einen glatten und einmal für einen rauen Bedruckstoff dargestellt (Messwerte wurden mit dem SpectroDens der Firma Techkon gemessen [114]).

In Grün ist die Farbdichte D ohne Polarisationsrichtung über D_{NP} , welche ohne Polarisationsrichtung gemessen wurde für einen rauen Bedruckstoff aufgetragen. In Rot ist der Zusammenhang für einen glatten Bedruckstoff dargestellt. Der angesprochene Einfluss der Polarisationsrichtung wird in den Ergebnissen der Messungen wiedergeben. Auf glattem Bedruckstoff ist der Einfluss der Polarisationsrichtung kleiner, als bei einem rauen Bedruckstoff. Dies ist daran zu erkennen, dass die Auftragung für den glatten Bedruckstoff näher an dem Ideal der Winkelhalbierenden liegt.

Nun sollen mittels des vorangegangenen beschriebenen numerischen Verfahrens Lösungen für den jeweiligen Oberflächenreflexionsanteil ρ in Abhängigkeit des Bedruckstoffes bestimmt werden. Als Ergebnis wird für den rauen Bedruckstoff ein $\rho = 0,056$ und für den glatten Bedruckstoff ein $\rho = 0,009$ bestimmt. Werden diese beiden Ergebnisse für ρ relativ bewertet, bedeutet das, dass von der Oberfläche des rauen Bedruckstoffes ungefähr fünfmal so viel Licht in Richtung des Sensors reflektiert wird wie von der glatten Oberfläche. Werden die bestimmten Werte für ρ in Gleichung 3.5 zur Berechnung der Farbdichte berücksichtigt und die so korrigierte Berechnung der Farbdichte, die auf Messungen ohne Polarisationsrichtung basieren, gegen Ergebnisse der Farbdichte, die mit Polarisationsfilter gemessen wurden, aufgetragen, ergibt sich der in Abbildung 36 dargestellte Zusammenhang. Dort ist einmal der aus Abbildung 35 bekannte Zusammenhang von mit Polfiltern gemessenen Farbdichten D über ohne Polfilter gemessenen Farbdichte D_{NP} dargestellt. Weiter ist die Farbdichte mit Polarisationsrichtung über der korrigierten Farbdichte ohne Polfilter aufgetragen.

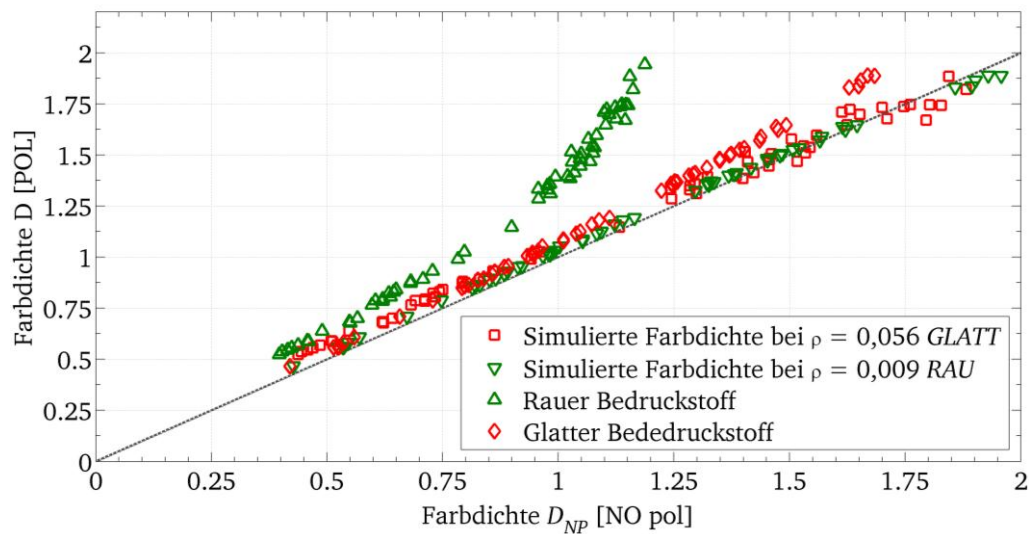


Abbildung 36: Korrektur durch den Parameter ρ für unterschiedlich raue Bedruckstoffe. In Rot ist das Ergebnis einer Messung der Farbdichte D mit Polfilter über einer ohne Polfilter, bzw. der korrigierten ohne Polfilter, für einen glatten Bedruckstoff aufgetragen. In Grün dieser Zusammenhang für einen rauen Bedruckstoff dargestellt (Messwerte wurden mit dem SpectroDens der Firma Techkon gemessen [114]).

In Grün ist der Zusammenhang für einen rauen und in Rot für einen glatten Bedruckstoff dargestellt. Durch die Abbildung der Werte auf der Winkelhalbierenden ist zu erkennen, dass mit Hilfe der bestimmten Werte für ρ die Berechnung der Farbdichte, aus Messungen ohne Polfiltereinrichtung, so korrigiert werden kann, dass das Ergebnis sehr gut mit einer Messung mit Polarisationsseinrichtung übereinstimmt.

Es wurde damit gezeigt, dass aus spektralphotometrischen Messungen mit und ohne Polarisationsfilter ein Wert für den Anteil an oberflächenreflektierter Reflexion ρ berechnet werden kann. Zudem wurde gezeigt, dass ein einzelner Wert für ρ ausreicht, um eine Korrektur zu bestimmen, die sowohl die Oberfläche der Druckfarbe, als auch des Bedruckstoffes beschreibt. Dabei ist ρ abhängig vom verwendeten Bedruckstoff. Weiter kann mit diesem Korrekturwert eine Messung der Farbdichte, die ohne Polarisationsseinrichtung durchgeführt wurde, so korrigiert werden, dass das Ergebnis einer solchen Messung vergleichbar mit einer Messung, die mit Polarisationsfilter durchgeführt wurde, ist.

3.3.3 Messunterlage

Bei einer Messung der Farbdichte mit einem Druckinspektionssystem wird neben den bisher untersuchten Unterschieden in der Messwerterfassung ebenfalls eine andere Messunterlage verwendet (vgl. Abschnitt 3.2.3). Um den quantitativen Einfluss eines mattschwarzen Messuntergrundes im Verhältnis zu einem reflektierenden, chromfarbigen Untergrund auf eine Berechnung der Farbdichte darstellen zu können, wurden Proben mit einem nach DIN 16536 aufgebauten Densitometer vermessen. Als Messgerät wurde das fm19 der Firma Grapho Metronic verwendet [55]. Mit diesem Messgerät wurden Proben unterschiedlicher gedruckter Schichtdicken auf den beiden Messuntergründen vermessen. Als Ergebnis wurden die Farbdichten des schwarzen Messuntergrundes über denen, die auf einem chromfarbigen Untergrund gemessen wurden, in Abbildung 37 aufgetragen.

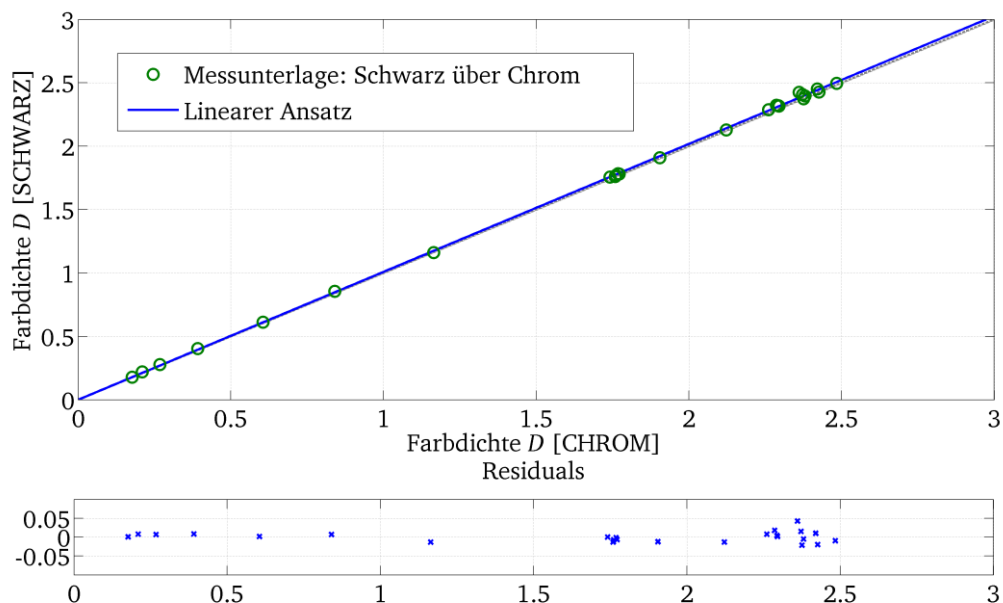


Abbildung 37: Farbdichtemessung auf mattschwarzem über chromfarbigem Messuntergrund. Der Zusammenhang wurde durch einen linearen Ansatz approximiert. Gemessen wurde Cyan auf rauem Bedruckstoff und mit dem Messgerät fm19 der Firma Grapho Metronic Meß- und Regeltechnik GmbH [55].

In Grün sind die Messergebnisse dargestellt. Dabei liegen mit zunehmender Schichtdicke die Farbdichten, die auf dem matt-

schwarzen Untergrund gemessen wurden, über den Farbdichten, die auf chromfarbigen Untergrund gemessen wurden. Dies ist schlüssig, denn durch den chromfarbigen Untergrund ist der Reflexionsgrad β größer, als bei dem absorbierenden mattschwarzen Untergrund. Mit größer werdenden Schichtdicken ist die Farbdichte im Volltonfeld unabhängig vom Messuntergrund, da eine hohe Schichtdicke das einfallende Licht vollständig absorbiert und somit der Untergrund keinen Einfluss haben kann. Da die Farbdichte relativ zum Bedruckstoff berechnet wird, ergibt sich für hohe Farbdichten ein stärkerer Unterschied zwischen dem Reflexionsgrad des Volltonfeldes und des Bedruckstoffes.

An diese Messergebnisse wurde eine lineare Funktion approximiert. Als Parameter wird nur ein Faktor B für den linearen Ansatz gewählt.

$$D_{SCHWARZ}(D_{CHROM}) = D_{CHROM} \cdot B \quad 3.9$$

Als Ergebnis wird $B = 1,01$ bestimmt. Anhand der gleichmäßig um den Nullpunkt streuenden Residuen und einem Bestimmtheitsmaß $R = 0,99$ bzw. einem $RMSE = 0,013$ kann belegt werden, dass die Abhängigkeit durch die unterschiedlichen Messuntergründe linear für sämtliche drucktechnisch relevanten Farbdichten beschrieben werden kann.

Damit wurde gezeigt, dass der abweichende Messuntergrund einen quantitativen Einfluss auf die Berechnung der Farbdichte hat und durch einen Faktor B korrigiert werden kann.

Mit diesem und den Ergebnissen aus den vorherigen Abschnitten des Unterkapitels 3.3 konnte gezeigt werden, dass die in Unterkapitel 3.2 dargestellten Unterschiede in der Messwertaufnahme einen quantitativen Einfluss auf das Ergebnis der Farbdichte haben. Dazu wurden Messungen mit einem Spektralphotometer, bei dem mit und ohne Polarisationsfilter gemessen werden kann, auf verschiedenen Proben durchgeführt und die Einflüsse der unterschiedlichen Messwerterfassung isoliert quantitativ dargestellt. Mit der quantitativen Kenntnis

der isolierten Einflüsse soll im nachfolgenden Unterkapitel der Einfluss der kombinierten Einflüsse beschrieben werden.

3.4 Transformationsfunktion der Farbdichte D^*_{DIS}

Mit der Kenntnis der quantitativen Beschreibungen aus dem vorangegangenen Unterkapitel, soll nun eine Methode folgen, die die Einflüsse kombiniert beschreibt. Das bedeutet, dass aus einer Messung, die unter den Messaufnahmebedingungen des Druckinspektionssystems durchgeführt wurde, in eine der normgerechten Messung äquivalente Farbdichte umgerechnet werden kann. Dazu sollen die bisher isoliert betrachteten Einflüsse kombiniert werden, um diese Umrechnung realisieren zu können. In Abbildung 38 ist diese Umrechnung schematisch dargestellt.

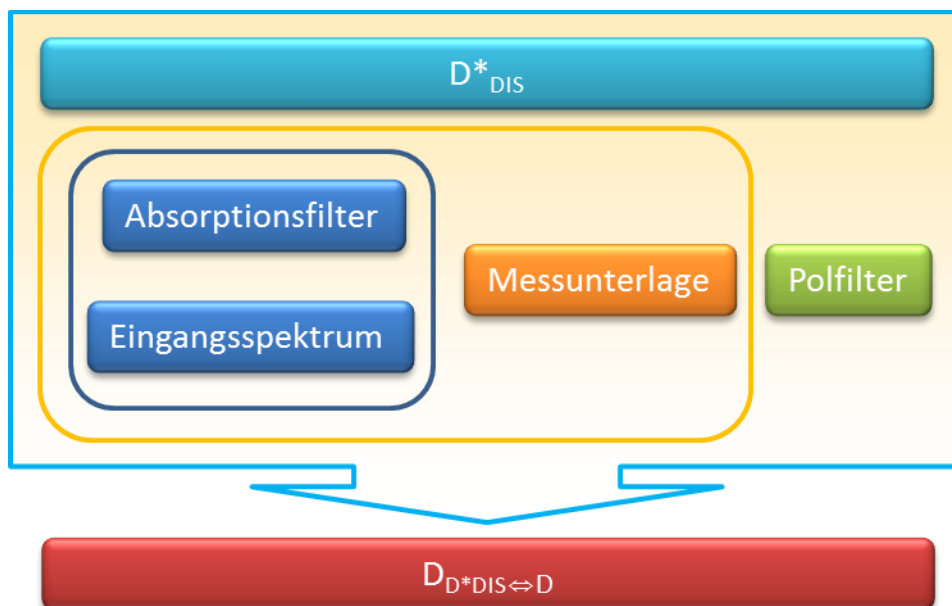


Abbildung 38: Umrechnung der Messergebnisse des Druckinspektionssystems in eine normäquivalente Farbdichte.

Dazu soll versucht werden die Einflüsse der Messunterlage, des Eingangsspektrums und des Absorptionsspektrums der Filter durch einen Parameter zu beschreiben. In der isolierten Betrachtung konnten diese Einflüsse jeweils durch lineare Ausdrücke beschrieben werden. Aus diesem Grund soll versucht werden auch die Kombination dieser Einflüsse durch einen linearen Korrekturterm δ zu beschreiben.

Der Einfluss des Polarisationsfilters konnte isoliert in Unterkapitel 3.3 mit einem Parameter ρ , der jeweils von den gewichteten Reflexionsgraden der Druckfarbe β_D und des Bedruckstoffes β_{D0} abgezogen werden muss, beschrieben werden. Diese Beschreibung des Einflusses der Polarisation wird in Gleichung 3.10 mit der Beschreibung der weiteren Einflüsse kombiniert.

$$D_{D \Leftrightarrow D_{DIS}^*} = \delta \cdot \log_{10} \frac{\beta_{D0} - \rho}{\beta_D - \rho} \quad 3.10$$

Das bedeutet, dass mit Kenntnis des Korrekturterms δ und des Oberflächenkorrekturterms ρ aus den gewichteten Reflexionsgraden der Druckfarbe β_D und des Bedruckstoffes β_{D0} , die ohne Polarisationsfilter gemessen wurden, eine der Norm äquivalente und auf Messungen mit Polfilter basierende Farbdichte $D_{D^*DIS \Leftrightarrow D}$ berechnet werden kann. Existiert eine Lösung für δ und ρ , kann somit eine Transformationsvorschrift angegeben werden. Lösungen für δ und ρ werden druckfarben- und vor allem bedruckstoffabhängig sein.

Um für δ und ρ Werte bestimmen zu können, werden zunächst analog zum Lösungsweg zur Bestimmung des Oberflächenreflexionsanteils aus Abschnitt 3.3.2 Messungen mit einem Spektralphotometer, welches über eine zuschaltbare Polarisationseinrichtung verfügt, auf Druckproben und den Bedruckstoffen der drei Druckfarben Cyan, Magenta und Gelb durchgeführt. Aus den Reflexionsgraden und den spektralen Charakteristiken von Eingangs- und Filterspektrum können zunächst einmal die Farbdichte nach DIN 16536 mit Polarisationsfilter und die Farbdichte D_{DIS}^* berechnet werden. D_{DIS}^* wird aus den ohne Polarisationseinrichtung Reflexionsgraden für Druckfarbe und Bedruckstoff, dem Eingangsspektrum einer fluoreszierenden Beleuchtung 840 und der spektralen Empfindlichkeitsverteilung der Absorptionsfilter der Kamera TVI XIIMUS berechnet. D_{DIS}^* beruht also auf den spektralen Charakteristiken des Druckinspektionssystem, aber nicht auf der Messgeometrie des DIS. Zur Unterscheidung einer Farbdichte, die aus realen Messungen mit einem Druckinspek-

tionssystem gemessen werden, wird der Stern im Index geführt.

Um Werte für die Korrekturterme δ und ρ bestimmen zu können, wird mittels MATLAB und der Funktion *fminsearch* der *RMSE* der Differenz aus den Messungen von D und D^*_{DIS} minimiert. Da die Messwerte der gewichteten Reflexionsgrade β_D und β_{D0} vor der Umrechnung in eine Farbdichte durch den Oberflächenreflexionsanteil in Form des Parameters ρ korrigiert werden, ist der Ansatz in Gleichung 3.11 nicht in Form einer Farbdichte notiert.

$$RMSE_{min} = \log_{10} \frac{\beta_{D0;1\dots k}}{\beta_{D;1\dots k}} - \left[\delta \cdot \left(\log_{10} \frac{\beta_{D0;1\dots k} - \rho}{\beta_{D;1\dots k} - \rho} \right) \right] \quad 3.11$$

Durch Lösung des Minimierungsansatzes aus Gleichung 3.11 können für jede Farb- und Materialkombination Werte für die Korrekturterme δ und ρ bestimmt werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Ergebnisse aus den Lösungen des Minimierungsansatzes aus Gleichung 3.11. Abhängig von Bedruckstoff und Druckfarbe ergeben sich unterschiedliche Ergebnisse für die Korrekturterme δ und ρ .

	Cyan (C)	Magenta (M)	Gelb (Y)
rauer Bedruckstoff			
δ	1,073	1,094	1,188
ρ	0,041	0,025	0,035
glatter Bedruckstoff			
δ	0,121	0,132	0,1201
ρ	0,0232	0,0241	0,0232

Mit Kenntnis der Werte für die Korrekturterme δ und ρ kann nun über Gleichung 3.10 aus den gewichteten Reflexionsgraden für Druckfarbe und Bedruckstoff, die ohne Polarisations-einrichtung aufgenommen wurden, eine normäquivalente Farbdichte $D_{D^*DIS \Leftrightarrow D}$ berechnet werden.

In Abbildung 39 ist die aus Messungen mit Polarisations-einrichtung durchgeführte und nach DIN 16536 berechnete Farbdichte D einmal über der Farbdichte D_{DIS}^* (Kreuze) und einmal die normäquivalente Farbdichte $D_{D^*DIS \Leftrightarrow D}$ (Kreise) aufgetragen. Die Auftragung erfolgt jeweils für die drei Druckfarben Cyan, Magenta und Gelb.

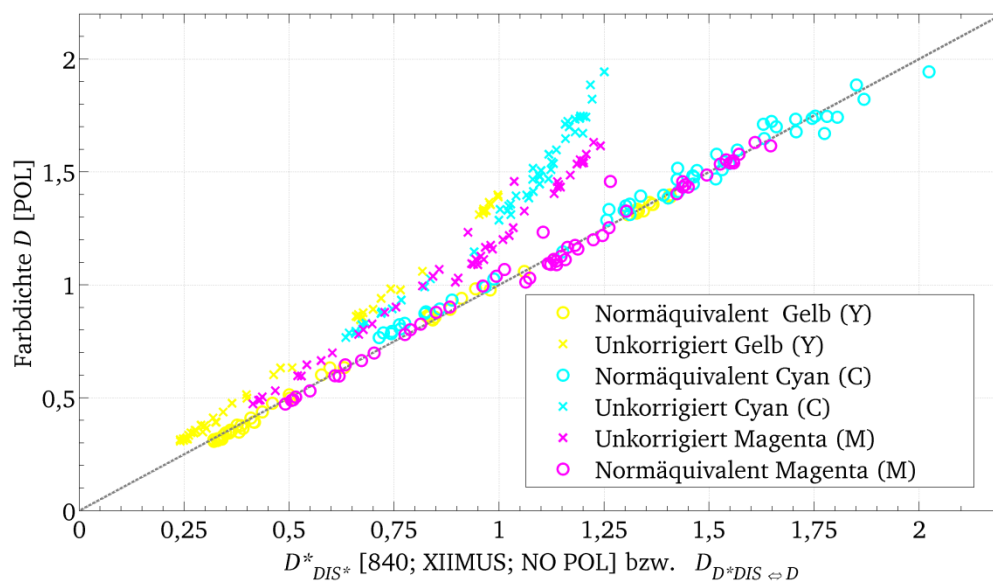


Abbildung 39: Farbdichte mit Polfiltereinrichtung einmal über der berechneten Farbdichte, die den spektralen Eigenschaften einer Messung durch ein Druckinspektionssystem entsprechen und einmal über der korrigierten normäquivalenten Farbdichte $D_{D^*DIS \Leftrightarrow D}$. Es werden Ergebnisse für CMY auf rauem Bedruckstoff dargestellt. Sämtliche hierfür zugrunde gelegten Messungen erfolgten mit dem SpectroDens der Techkon GmbH [114].

Zum einen ist für die Auftragung der Farbdichte D über D_{DIS}^* die charakteristische Form aus Abschnitt 3.3.2 durch die Polarisations-einrichtung zu erkennen. Durch die homogene Verteilung der Ergebnisse der normäquivalenten Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D^*DIS}$ um den Idealzusammenhang in Form der Winkelhalbierenden sowie einem Wert $RMSE \leq 10^{-3}$ für die Wurzel aus der Summe der mittleren Fehlerquadrate der numerischen Lösung, wird deutlich, dass die Lösung für die Werte für die Korrekturterme δ und ρ sehr gut ist. Damit ist weiter bewiesen, dass die Transformationsfunktion aus Gleichung 3.10 lösbar ist und zudem eine sehr gut abbildende Funktion zur Umrechnung von Messungen, die ohne Polarisations-einrich-

tung und unter normabweichenden spektralen Bedingungen erstellt wurden, in eine normäquivalente Farbdichte ist.

3.5 Zusammenfassende Betrachtung

In Kapitel 3 wurde zunächst die Messwerterfassung durch das Druckinspektionssystem dargestellt. Dabei wurde der Aufbau des Messfeldes, sowie die grundlegende Berechnung der Farbdichte aus den RGB-Kameradaten erläutert. Im Anschluss wurden die in DIN 16536 geforderten und durch das Druckinspektionssystem realisierbaren Bedingungen in der Messwerterfassung gegenübergestellt und qualitativ dargestellt. Damit konnte ein Verständnis für die einzelnen isoliert dargestellten Einflüsse auf die Messwerterfassung und der daraus resultierenden Berechnung der Farbdichte erarbeitet werden. Im Anschluss wurde der quantitative Einfluss der unterschiedlichen Bedingungen der Messwerterfassung isoliert voneinander bestimmt. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte dann eine Transformationsfunktion bestimmt und die darin enthaltenen Parameter durch eine numerische Lösung bestimmt werden.

Sämtliche für diese Berechnungen verwendeten Messungen wurden mit einem Spektralphotometer der Handgeräteklasse durchgeführt, welches sich nicht für die Steuerung einer Druckmaschine eignet. Zudem sind in diesem Kapitel nur berechnete Farbdichten des Druckinspektionssystems verwendet worden, die beispielweise die Detektionsgeometrie oder die Abstrahlcharakteristik der Beleuchtung des DIS nicht berücksichtigen. Um also mit dem Druckinspektionssystem ein rückführbares und präzises Ergebnis für die Farbdichte bestimmen zu können, müssen hochwertigere rückführbar genaue Messgeräte, sowie das DIS selbst verwendet werden. Weiter sollte auf eine größere Datenbasis zurückgegriffen werden, um den Zusammenhang zwischen der Farbdichte des Druckinspektionssystems D_{DIS}^* und einer normäquivalenten Farbdichte $D_D \Leftrightarrow D_{DIS}^*$ präzise beschreiben zu können. Als Ansatzfunktion hierfür kann die in diesem Kapitel gefundene Transformationsfunktion verwendet werden.

4 Kalibrierung des Druckinspektionssystems

Im vorangegangenen Kapitel 3 wurde gezeigt, dass trotz der Unterschiede zu den normativ festgelegten Bedingungen in der Messwertaufnahme bei einem Druckinspektionssystem eine gerätespezifische Farbdichte D^*_{DIS} aus den RGB-Daten berechnet werden kann. Diese Farbdichte weicht durch diese Unterschiede zu einem Ergebnis der normgerecht ermittelten Farbdichte D ab, kann aber in eine normäquivalente Farbdichte umgerechnet werden. In Kapitel 3 wurden die Eigenschaften des Druckinspektionssystems jedoch simuliert und einige Eigenschaften, wie die Abstrahlcharakteristik der Beleuchtung, nicht vollständig beschrieben.

In diesem Kapitel soll nun die reale Ausgabe des Druckinspektionssystems auf ein Referenzmessgerät kalibriert werden. Dazu werden zunächst Grundlagen einer Kalibrierung und die verwendete Kalibriervorschrift dargestellt. Im Anschluss wird der Aufbau eines Versuchsstandes, mit dem eine Kalibrierung entsprechend der Kalibriervorschrift möglich ist, vorgestellt. Weiter werden Untersuchung zur Messmittelfähigkeit sowie Maßnahmen zur Streulichtreduktion gezeigt. Zum Schluss werden das Kalibrierergebnis sowie daraus abgeleitete Kalibrierfunktionen dargestellt.

4.1 Grundlagen der Kalibrierung

Ziel ist es weltweit richtige Messungen durchführen zu können [30]. Dies setzt voraus, dass einheitliche Bezugsnormale verwendet werden, auf die Ergebnisse von Messgeräten zurückgeführt werden können. Dazu werden Bezugsnormale für die Basiseinheiten über Naturkonstanten⁵ definiert. Jedoch ist eine praxisrelevante Maßverkörperung durch diese Bezugsnormale nicht realisierbar. Aus diesem Grund werden für fast

⁵ Eine Ausnahme stellt die definierte Maßverkörperung durch einen Prototypen der Masse dar.

jede Messgröße Primärnormale gebildet. Von diesen Primärnormalen werden Sekundärnormale abgeleitet, die zur Eichung der Referenz- bzw. Arbeitsnormalen verwendet werden. Durch diese in Abbildung 40 dargestellte ununterbrochene Kette von Vergleichen auf geeignete Bezugsnormale, ist eine Rückführbarkeit des Messergebnisses gegeben [2, 95].

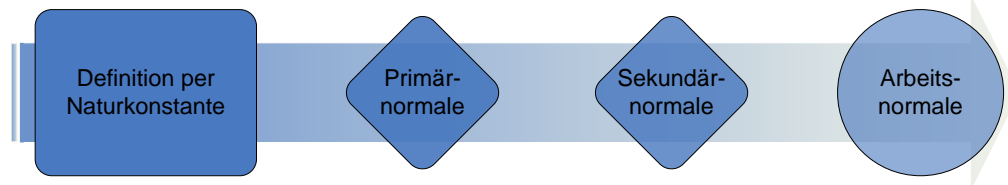


Abbildung 40: Hierarchie der Normale. Von links nach rechts fällt die Genauigkeit und steigt die Praktikabilität. Da die einzelnen Normal aufeinander aufbauen (links nach rechts), ist eine Rückführbarkeit (rechts nach links) möglich.

Um ein richtiges und rückführbares Ergebnis mit einem Messgerät erzeugen zu können, muss es demnach kalibriert sein. Generell wird bei einer Kalibrierung⁶ nach Gleichung 4.1 ein Zusammenhang $K_i(y_i)$ zwischen dem Erwartungswert einer Ausgangsgröße Y und dem dazugehörendem richtigen Wert der Eingangsgröße X_i bezogen auf ein Normal ermittelt.

$$K(y_i) = x_i \quad 4.1$$

Auf Basis dieses Zusammenhanges können eine Korrekturtafel, Kalibrierfaktoren oder eine empirische Kalibrierfunktion erstellt werden. Die so gewonnene Kalibrierfunktion ist eine Näherung der theoretischen Kalibrierfunktion, welche exakt den funktionalen Zusammenhang zwischen dem Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem richtigen Wert einer Messgröße darstellt.

Eine Kalibrierung stellt jedoch nur die Rückführbarkeit eines Ergebnisses sicher. Unabhängig von einer erfolgreichen Kalib-

⁶ Abgegrenzt werden muss der Begriff der Justierung. Bei einer Justierung wird immer die Anzeige eines Gerätes abgeglichen, um systematische Abweichungen zu beseitigen. Dies erfordert immer ein Eingreifen in das Messgerät.

rierung und selbst unter sorgfältigster Durchführung einer Messung ist jedes Messergebnis mit einer Unsicherheit behaftet, die es ebenfalls zu betrachten gilt [31, 32, 98].

Im Fall dieser Arbeit soll das Ergebnis einer Messung der Farbdichte, welche mit dem Druckinspektionssystem erfolgt ist, über ein rückführbar kalibriertes Referenzmessgerät kalibriert werden. Das bedeutet, dass über Messungen eines Prüflings mit dem Druckinspektionssystem Erwartungswerte für die Ausgangsgröße bestimmt werden. Durch Messungen desselben Prüflings mit dem Referenzmessgerät können zu dem Prüfling gehörende richtige Werte bestimmt werden. Aus der Korrelation von Erwartungswert und richtigem Wert kann der funktionale Zusammenhang in Gleichung 4.1 bestimmt werden.

4.2 Kalibriervorschrift

Ziel der in diesem Unterkapitel dargestellten Kalibrierung ist es, ein korrektes rückführbares Ergebnis einer Messung der Farbdichte durch das Druckinspektionssystem gewährleisten zu können. Dazu wird ein rückführbar vermessenes und damit bekanntes Target (der Kalibrierbogen) durch das Druckinspektionssystem vermessen. Aus diesem gemessenen Wert der Farbdichte und der Kenntnis des korrekten Wertes des Kalibrierbogens können eine Korrektur und damit die Kalibrierung erfolgen. Die Ermittlung dieser Korrekturwerte erfolgt für ein breites Feld möglicher unterschiedlicher Einflussparameter. In dem Fall der Kalibrierung des Druckinspektionssystems für eine Farbdichte, sind die berücksichtigten Parameter Bedruckstoff und Druckfarbe.

Der Ablauf der durchgeführten Kalibrierung entspricht der für diese Arbeit entwickelten Kalibriervorschrift für das Druckinspektionssystem. Die entwickelte Kalibriervorschrift ist in Abbildung 41 dargestellt.

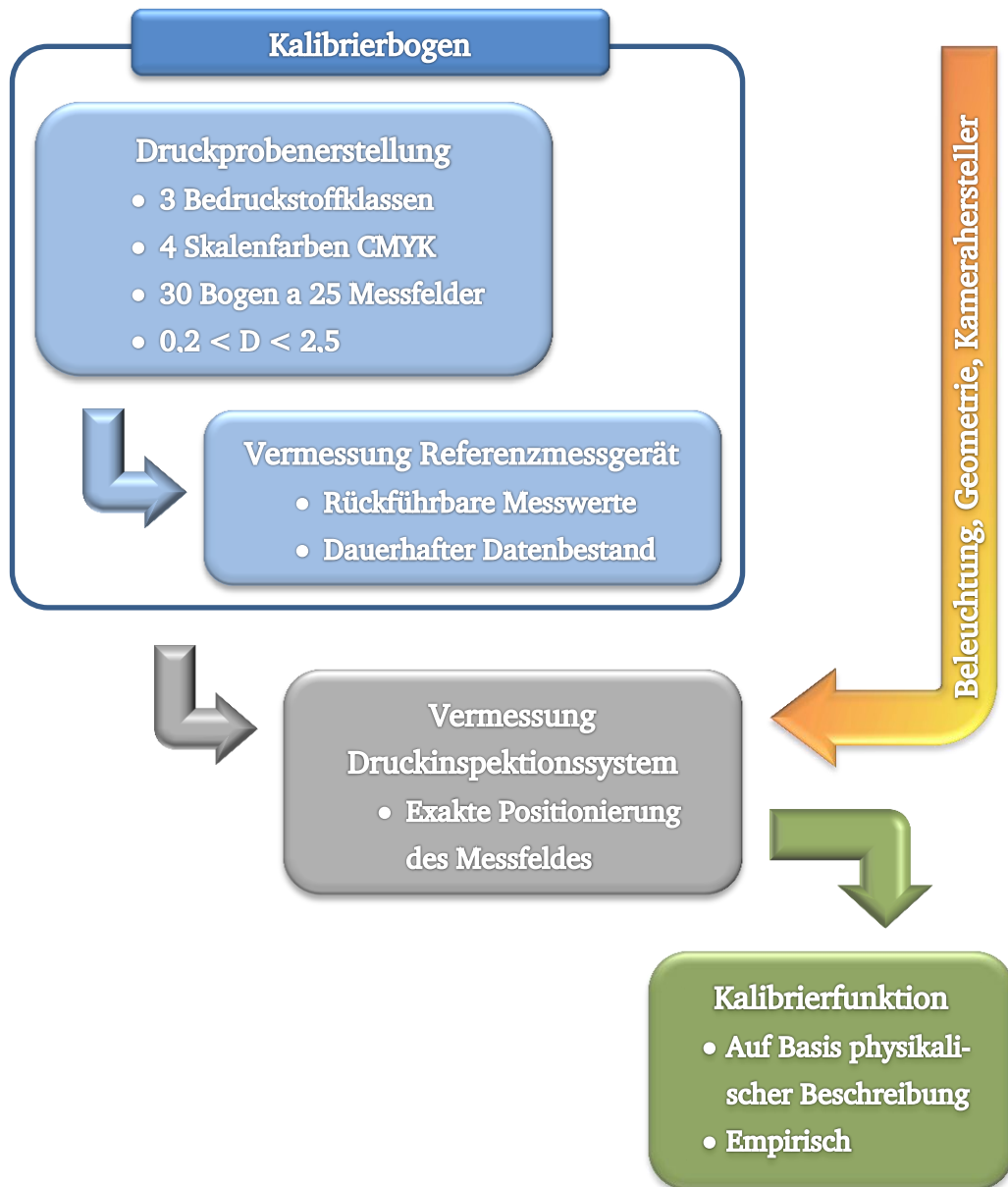


Abbildung 41: Kalibriervorschrift für eine Kalibrierung des Druckinspektionssystems für eine Farbdichtemessung.

In einem ersten Schritt werden die Kalibrierbogen erstellt. Das bedeutet, dass zunächst Drucke auf verschiedenen Bedruckstoffen und Druckfarben erstellt werden, von denen die normgerecht bestimmte Farbdichte unbekannt ist. Im Anschluss wird für diese Drucke durch ein rückführbar kalibriertes Referenzmessgerät die normgerechte Farbdichte D bestimmt. Mit Kenntnis der richtigen Farbdichte der Druckproben, entstehen

somit die Kalibrierbogen. Für einen bestimmten Zeitraum⁷ stellen die Kalibrierbogen damit einen dauerhaften Datenbestand dar. Im Anschluss werden diese Kalibrierbogen mittels des Druckinspektionssystems vermessen und die entsprechende Farbdichte D^*_{DIS} berechnet. Aus der Korrelation der Daten kann die Kalibrierfunktion bestimmt werden. Diese Kalibrierfunktion gilt zunächst nur exakt für die verwendeten Teilsysteme des Druckinspektionssystems. Durch Änderungen des Kameratyps oder der Beleuchtung müssen für das jeweilig modifizierte Setup des Druckinspektionssystems neue Kalibrierfunktionen bestimmt werden. Die mathematische Beschreibung der Kalibrierfunktion kann entweder auf Basis von bekannten physikalischen Zusammenhängen (Transformationsfunktion aus Kapitel 3.4) oder einem rein empirischen Ansatz erfolgen.

Weitere Ziele der Kalibrierung sind die Identifikation von Stör- und Einflussgrößen. Damit ist gemeint, dass Einflüsse wie beispielsweise Positionierungsungenauigkeiten des Messfeldes verstanden werden sollen. Aus dieser Kenntnis können Standardisierungsbedingungen für eine Farbdichtemessung durch ein Druckinspektionssystem ermittelt werden.

4.3 Das Bezugsnormal: Der Kalibrierbogen

In Abbildung 42 ist das Layout der verwendeten Druckform für die Kalibrierbogen dargestellt. Das Layout der Druckform ermöglicht sowohl eine gleichmäßige Farbabnahme aus der Druckmaschine, sowie viele unterschiedliche Messstellen. Die Volltonfelder an den möglichen Messstellen sollten möglichst homogen bedruckt sein. Dies hat den Hintergrund, dass innerhalb eines Messfeldes gemittelt wird. Ist der Farbauftrag innerhalb eines Messfeldes nicht homogen, so ist die Mittelwertbildung über dem Messfeld fehlerbehaftet.

⁷ Durch Alterung verändern Bedruckstoff und Druckfarben der Kalibrierbogen ihre spektralen Eigenschaften. Damit ist ebenfalls der gemessene Wert der Farbdichte nicht mehr verbindlich korrekt.

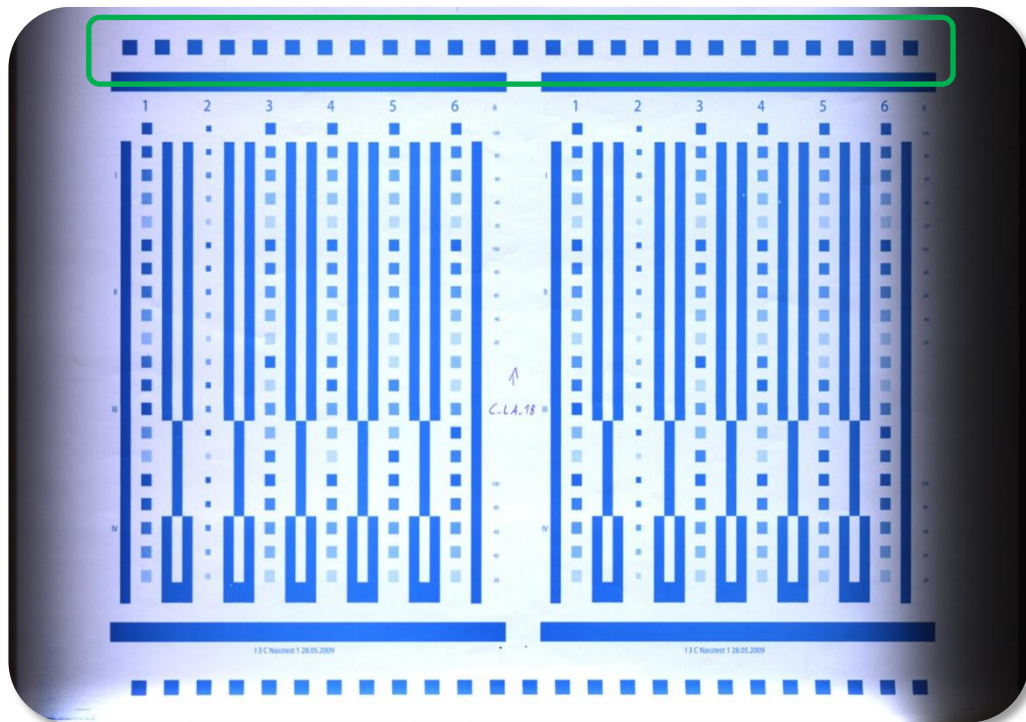


Abbildung 42 Aufnahme des Druckbildes durch das Druckinspektionssystem. Oben (grüner Rahmen) sind die Volltonfelder, die zur Kalibrierung verwendet wurden zu sehen. Es ist eine deutliche Vignettierung erkennbar, die durch den Relativbezug zum Bedruckstoff und dem linearen Verhalten der Kamera den Messwert nicht beeinflusst. Dieses Layout wurde für sämtliche Untersuchungen verwendet.

Es sollte weiter möglich sein das farbliche Umfeld der Messstelle variieren zu können. Dazu sind bei der Anordnung im Layout schachbrettähnlich Strukturen für die Messstellen eingebracht worden. Dabei muss sichergestellt sein, dass für jede farbige Messstelle eine korrespondierende unbedruckte Fläche existiert, um eine permanente Weißreferenzierung gewährleisten zu können, durch die Vignettierungseinflüsse kompensiert werden (vgl. Abschnitt 3.1.2). Des Weiteren wurden verschiedene Rasterflächen integriert, um das Layout der Druckform für eventuelle Messungen auf Rastertonflächen nicht neu gestalten zu müssen.

4.4 Versuchsaufbau zur Kalibrierung

Um die Vorgehensweise der vorgestellten Kalibriervorschrift realisieren zu können, müssen einige Voraussetzungen geschaffen werden. Zum einen muss ein geeignetes Referenz-

messgerät und zum anderen eine Einrichtung zur präzisen und wiederholgenauen Messung der Kalibrierbogen mittels des Druckinspektionssystems realisiert werden.

4.4.1 Referenzmessgerät

Für die Kalibrierung wurde als Referenzgerät das in Abbildung 43 dargestellte Messgerät fm19 der Firma grapho metronic verwendet [55].

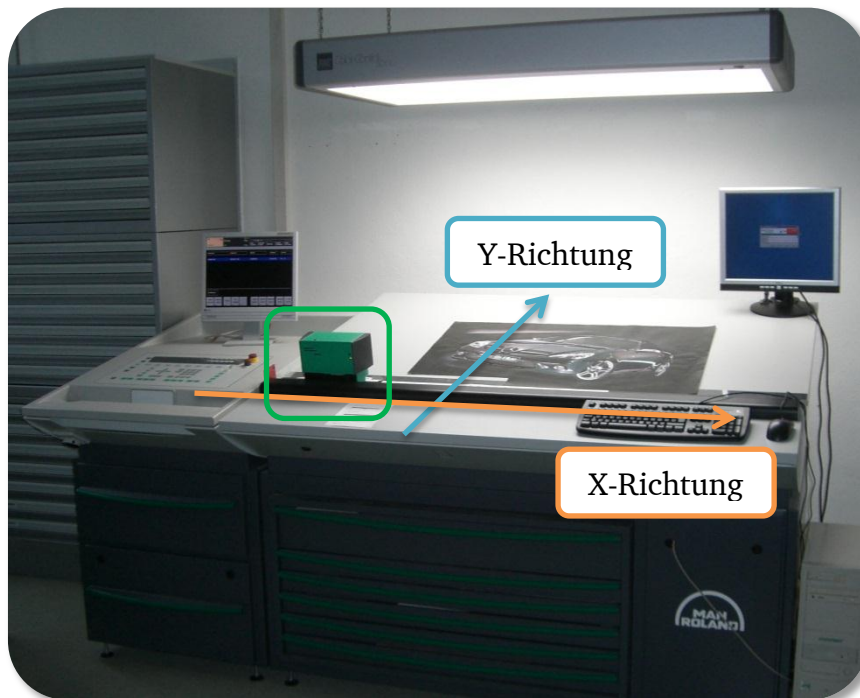


Abbildung 43: Messkopf fm19 (grüner Rahmen) an der Farbregelanlage ColorPilot der manroland AG. Der Messkopf kann in X- und Y-Richtung verfahren [54, 55].

Dies ist ein Leitstandmessgerät mit motorisch angetriebener und automatisierter Positionierung. Der Messkopf fm19 ist in die Farbregelanlage ColorPilot der manroland AG integriert.

Der Messkopf fm19 ist in Abbildung 44 von unten, also mit Sicht auf die Messöffnungen dargestellt. Er ist mit zwei Sensoren ausgestattet: einem Spektralphotometer (S) und einem densitometrischen Messkopf nach DIN 16536 (D). So ist es möglich, in einem Durchgang farbmetrische Größen aus dem ohne Polarisationsfilter gemessenen Reflexionsspektrum, so-

wie die normkonforme Farbdichte mit Polarisationsfiltern zu messen.

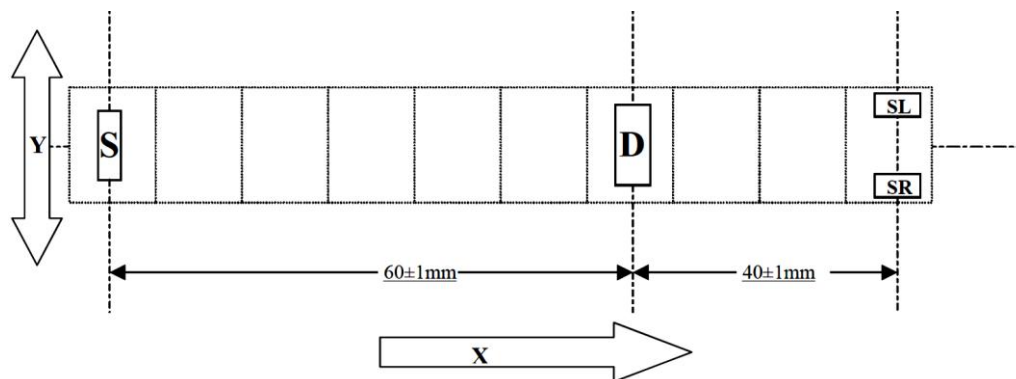


Abbildung 44: Blick von unten auf den Messkopf fm19. Geometrie der Messfelder des Spektralphotometers S, des Densitometers D und der Spurensensoren SL bzw. SR [54].

Weiter sind die Spurensensoren SL und SR zu sehen. Durch diese Sensoren wird die Messposition automatisch und relativ zum Druckbild bestimmt. Die Blendengröße des Densitometers wird mit 1 x 2,5mm angegeben. Durch Untersuchungen an definierten Druckmustern konnte für das Messgerät eine exakte Blendengröße von 1 x 2,1mm festgestellt werden [109]. Dies widerspricht den Angaben des Herstellers. Im Laufe dieser Arbeit wurde von den ermittelten Ergebnissen der Untersuchungen ausgegangen. Durch diese Blendengröße unterschreitet das Messfeld des Referenzmessgerätes die normativen Bedingungen für den Fall, dass gerasterte Felder gemessen werden (vgl. Abschnitt 3.2.4). Da für die Kalibrierung nur Volltonflächen vermessen werden, ist dies kein Nachteil.

Die Beleuchtung der Messstelle des densitometrischen Messkopfes erfolgt über eine gasgefüllte Glühlampe. Dabei ist die Spannungsversorgung stabilisiert, um über die Lebenszeit eine kontinuierliche Strahlungsabgabe zu gewährleisten. Gemessen wird die Reflexion über im Strahlengang des fm19-Messkopfes eingebaute Filter und eine Polarisationseinrichtung mit Polarisator und Analysator. Damit ist der Aufbau des Messkopfes sehr eng an die Anforderungen der DIN 16356 angelehnt.

Der Messkopf kann durch die Positioniereinrichtung 25mm in Y-Richtung und 1100mm in X-Richtung bewegt werden. Zudem besteht die Möglichkeit alle 1/10mm Fahrweg in X-Richtung eine Messung auszulösen. Die Steuerung dieses Gerätes ist für eine Anwender unabhängige Bedienung und zur Messung genormter Druckkontrollstreifen ausgelegt [26]. Dabei wird von den angesprochenen Spursensoren automatisch der Anfang des Druckkontrollstreifens in X- und Y-Richtung detektiert. Nach der Positionsbestimmung wird automatisch die Farbdichte für jedes Messfeld eingelesen und gespeichert.

Es muss sichergestellt sein, dass mit dem Referenzmessgerät und dem Druckinspektionssystem an derselben Stelle im Volltonfeld des Kalibrierbogens gemessen wird. Aus diesem Grund muss für die Vermessung der Kalibrierbogen auf dem Referenzmessgerät die Arbeitsweise der Positionierung exakt verstanden werden. Da trotz Admin-Tool der Bedienungssoftware ein Auslesen der Positionsdaten unmöglich ist und keine definierte Position in Y-Richtung angesteuert werden kann, wurde das Verhalten der Positionierautomatik grundlegend untersucht [109]. Dazu wurden definierte Muster vermessen.

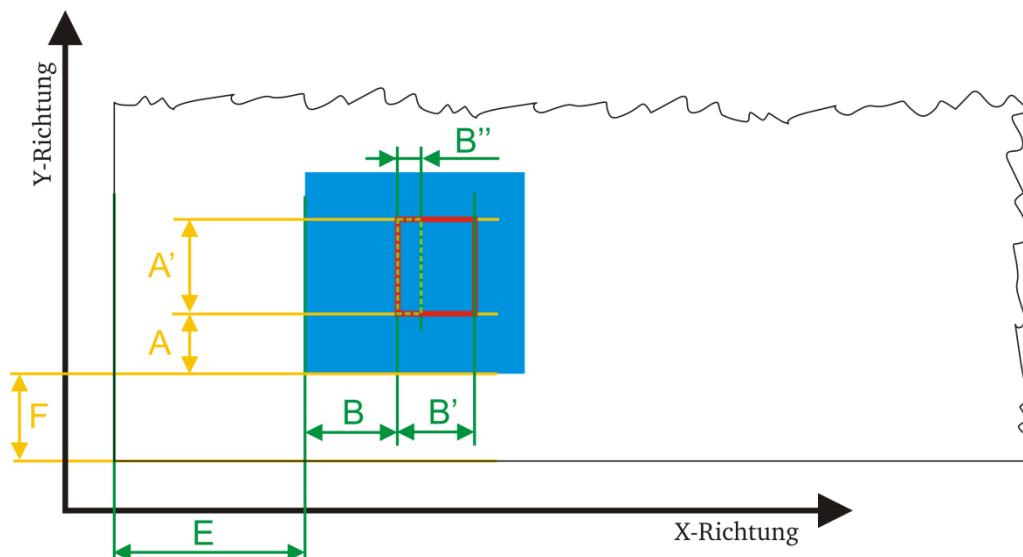


Abbildung 45: Position der Messblendenöffnung relativ zum zu vermessenden Volltonfeld. Gestrichelt in Hellgrün ist die Messblendenöffnung dargestellt. In Rot ist das durch Mittelwertbildung realisierte Messfeld abgebildet.

Anhand der daraus resultierenden Messwerte konnte ein Rückschluss auf die Positionierung des Messkopfes, der Lage der Messfläche sowie die exakte Größe des Messfeldes bestimmt werden.

Die Position der Messblendenöffnung der fm19 in Abbildung 45 wird durch die untere linke Ecke des Volltonfeldes bestimmt. In Y-Richtung ist das der Abstand F . F wird reproduzierbar auf $1/10\text{mm}$ durch die Spursensoren des Messgerätes detektiert. Der Abstand A des Messfeldes zum Volltonfeld beträgt $1,45\text{mm}$. Die Höhe des Messfeldes A' beträgt $2,1\text{mm}$ [109].

Um in der Messung der Farbdichte durch das Druckinspektionssystem Effekte durch die Ränder der Volltonflächen bzw. der Umgebung der Volltonflächen zu verhindern, sollte das Messfeld deutlich innerhalb des Volltonfeldes liegen. Deshalb wurde festgelegt, dass die Farbdichte exakt einen Abstand B von 1mm relativ zum Volltonfeld gemessen wird. Um eine ausreichend große Fläche vermessen zu können, wurde eine Breite B' des Messfeldes auf eine Größe exakt 3mm festgelegt. Für die Breite der Messblende B'' in X-Richtung wurde eine Größe von 1mm bestimmt.

In X-Richtung gibt es keine Positionierungsmöglichkeit. Die geometrischen Daten von genormten Druckkontrollstreifen sind in der Steuerung hinterlegt und können somit gezielt ausgelesen werden. Die Anordnung der Volltonfelder auf den Kalibrierbogen entspricht jedoch keiner Norm.

Aus diesem Grund wird der Kalibrierbogen über die gesamte Breite in X-Richtung vermessen. Dazu wird alle $1/10\text{mm}$ Fahrweg in X-Richtung je ein Messwert für die Farbdichte aufgezeichnet und abgespeichert. Ein Ergebnis ist in Abbildung 46 dargestellt. Dort ist oben in der Abbildung das Muster der zu vermessenden Volltonfelder gezeigt. Der Messkopf wird nun über diesen Streifen bewegt und über die Messblende alle $1/10\text{mm}$ Fahrweg ein Messwert aufgenommen. Dabei werden je nach Position des Messkopfes zum Teil die Farbdichte vom Papierweiß, die Farbdichte eines Volltonfeldes

oder aus anteiligen Mischungen von Papierweis und Volltonfeld die Farbdichte gemessen. In Abbildung 46 ist das Ergebnis der Messung der Farbdichte über dem Verfahrensweg aufgetragen. Es ist zu sehen, dass sich für die Farbdichte an den unbedruckten Stellen ein konstanter Wert $D < 0,1$ ergibt. In den Übergängen zu den Volltonflächen steigt der Wert der Farbdichte stark an, bis die Öffnung der Messblende vollständig auf dem Volltonfeld misst. Über die Bogenbreite, aber auch innerhalb der Volltonflächen schwankt die Farbdichte ebenfalls. Dies ist drucktechnisch bedingt.

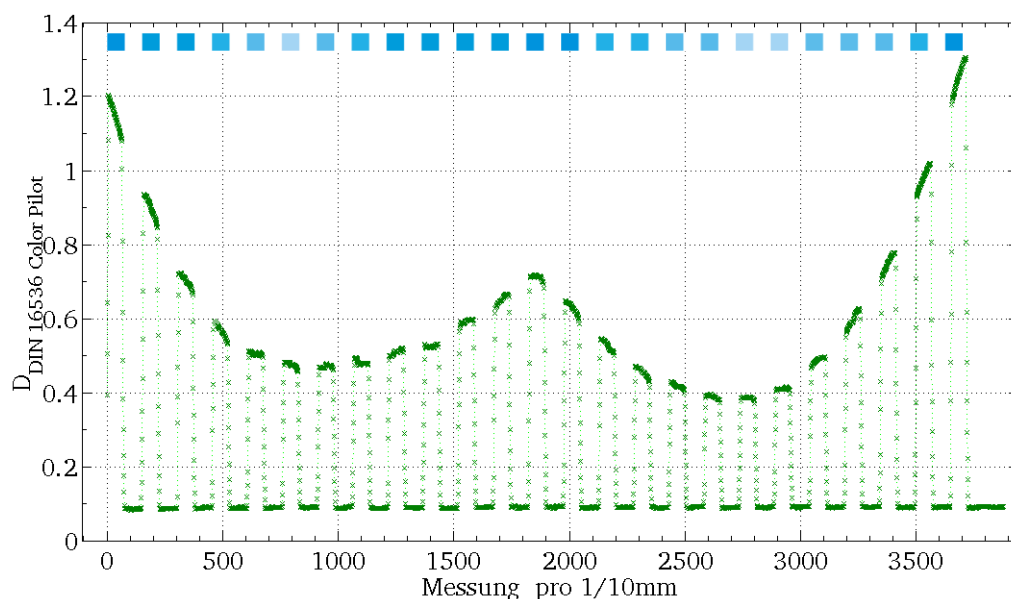


Abbildung 46: Daten einer Messung durch das Referenzmessgerät fm19. Oben im Diagramm ist der zu den Messwerten gehörige Streifen mit den Farbfeldern des Kalibrierbogens dargestellt.

Da die Auflösung der Messwertaufzeichnung in X-Richtung bekannt ist, kann rückwirkend eine positionsgenaue Separation der Messergebnisse erfolgen. Dies erfolgt über einen Vergleich aufeinanderfolgender Messwerte. Im Übergang vom unbedruckten zum bedruckten Bereich steigt die gemessene Farbdichte in Abhängigkeit zum Anteil des Volltonfeldes zum unbedruckten Bereich. Anhand dieser Information und der Kenntnis der Messfeldgröße ist somit die Position der Volltonfelder in X-Richtung mit einer Genauigkeit von $1/10\text{mm}$ möglich. Ausgehend von diesen Startpositionen können die Mess-

werte nach oben genannten Definitionen (Abstände A, A', B, B') separiert werden.

Das Referenzgerät fm19 wurde vor dem Kalibrierprozess der Messwertausgabe des Druckinspektionssystems mittels eines Herstellernormals kalibriert. Damit ist das Ergebnis einer Messung mit diesem Referenzmessgerät über das Herstellernormal rückführbar.

4.4.2 Messung mittels Druckinspektionssystems

Um die Farbdichte der Kalibrierbogen mit dem Druckinspektionssystem an exakt derselben Stelle messen zu können, an der mittels des Referenzmessgerätes gemessen wurde, wird eine Positionierungs-, Ausrichtungs- und Transporteinrichtung benötigt. Ideale Voraussetzungen hierfür bringt eine Bogenoffsetdruckmaschine mit Seiten- und Vorderziehmarke mit.

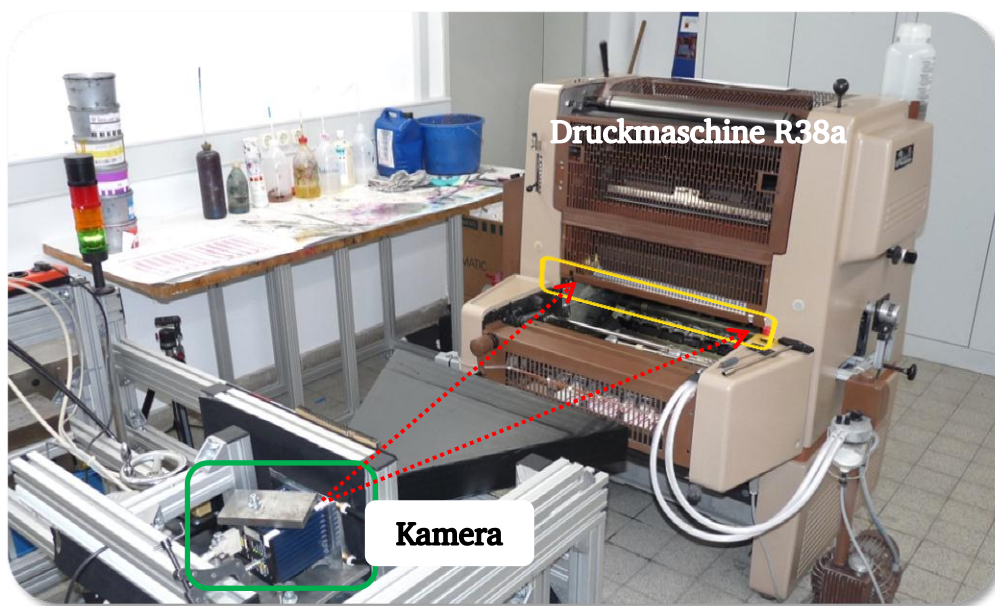


Abbildung 47: Versuchsstand für die Messwertaufnahme durch das Druckinspektionssystem. Im rechten Bereich ist die für die Positionierung verwendete Druckmaschine R38a zu sehen. Links sind die Streulichtblende und die Zeilenkamera (grüner Rahmen) abgebildet. Der gelbe Rahmen zeigt den Spalt, durch den die Bildaufnahme des DIS erfolgt (vgl. Abbildung 48). Die roten Pfeile zeigen die Aufnahmeebene der Kamera.

Hier können die Kalibrierbogen einzeln, wiederholgenau und exakt positioniert sowie an der Messstelle vorbei trans-

portiert werden. Verwendet wurde für diese Aufgabe eine ROTAPRINT R38A [1].

In Abbildung 47 ist die Integration des Druckinspektionssystems in die Bogendruckmaschine dargestellt. Um mit dem Druckinspektionssystem Bilder aufnehmen bzw. Messungen durchführen zu können, sind ein Drehwinkelgeber zur Synchronisation der Belichtung der Kamera zur Umdrehungsgeschwindigkeit des Gegendruckzylinders und die Beleuchtung installiert worden. Die Beleuchtung ist aufgrund der baulichen Situation in der Druckmaschine leicht modifiziert. Optisch relevante Bauteile bleiben unangetastet. In Abbildung 48 ist der Blick in den Spalt an der Druckmaschine zu sehen, in dem die Bildaufnahme des Druckinspektionssystems erfolgt.



Abbildung 48: Blick in den beleuchteten Spalt in der Druckmaschine Rotaprint R38a. In diesem Bereich wird das Bild des Druckinspektionssystems mittels der Zeilenkamera TVI XIIMUS aufgenommen.

Kamera und Beleuchtung entsprechen den Standardbauteilen des Druckinspektionssystems, welche in Abschnitt 2.2.3 beschrieben wurden. Die Messwertaufnahme und die Berechnung der Farbdichte D^*_{DIS} , welche mit dem Druckinspektionssystem aufgenommen wurde, entsprechen dem Verfahren, welches in Kapitel 3.1.2 erläutert wird.

4.5 Messmittelfähigkeit der Messverfahren

Generell kann eine Aussage über die Messunsicherheit immer nur für das Ergebnis einer Messung angegeben werden [68, 75, 98]. Um ein Maß für die Messmittelfähigkeit hinsichtlich der Reproduzierbarkeit einer Messung angeben zu können, wird nach Gleichung 4.2 die zweifache Standardabweichung 2σ einer durchgeführten Messung verwendet [24].

$$2\sigma = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 4.2$$

Dabei ist n die Anzahl der Messungen, x_i der Messwert der i -ten Messung und \bar{x} der Mittelwert der Messungen. Die zweifache Standardabweichung schließt unter der Annahme einer Normalverteilung 95,4% der zugrunde gelegten Messwerte ein. Sie wird gewählt, um ein ausreichend hohes Maß an Sicherheit zu haben, dass weitere Messungen innerhalb des angegebenen Intervalls liegen. Aus dem so ermittelten Kennwert können beide Messgeräte bezüglich der Reproduzierbarkeit des Messwertes verglichen und bewertet werden. Dies ist vor allem notwendig, da für Messungen durch das Druckinspektionssystem keinerlei Informationen bezüglich der Reproduzierbarkeit eines Messwertes der Farbdichte vorliegen. Um eine begründbare Kalibrierfunktion für die Messung der Farbdichte mittels Druckinspektionssystem abzuleiten, muss die Reproduzierbarkeit des Messwertes bekannt sein.

Referenzmessgerät: Color Pilot

Für das verwendete Referenzmessgerät fm19 der grapho metronic GmbH liegen Herstellerangaben über die Reproduzierbarkeit des Messwertes vor[55]. Nach diesen Angaben sollen Messungen für Farbdichten $D < 2$ um maximal $\pm 0,01$ abweichen. Da bei hohen Farbdichten sehr geringe Intensitäten vom Messgerät detektiert werden, ist für Messungen von hohen Farbdichten das Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) am schlechtesten. Demnach ist für Messungen niedrigerer Farbdichten eine bessere Reproduzierbarkeit zu erwarten. Um die Angabe des Herstellers zu verifizieren und die Reproduzierbarkeit für niedrigere Farbdichten zu ermitteln, sind 20 Wiederholungsmessungen für verschiedene Farbdichten durchgeführt worden. Als Größe für die Reproduzierbarkeit wird die zweifache Standardabweichung 2σ einer Messung verwendet.

In Abbildung 49 ist das Ergebnis der Untersuchung durch die Auftragung der zweifachen Standardabweichung über der

Farbdichte nach DIN 16536 dargestellt. Zusätzlich wurde durch den Verlauf eine Exponentialfunktion (rote Auftragung) approximiert, um die Streuung der zweifachen Standardabweichung beurteilen zu können. Im unteren Teil der Abbildung sind die resultierenden Residuen aufgetragen.

Abhängig von der gemessenen Farbdichte fällt die zweifache Standardabweichung 2σ durch das zunehmend bessere Signal/Rausch-Verhältnis (SNR) für Farbdichten $D < 1,5$ unter die Herstellerangabe von $2\sigma = \pm 0,01$. Für hohe Farbdichten $D > 2$ liegt die zweifache Standardabweichung 2σ deutlich über der Herstellerangabe.

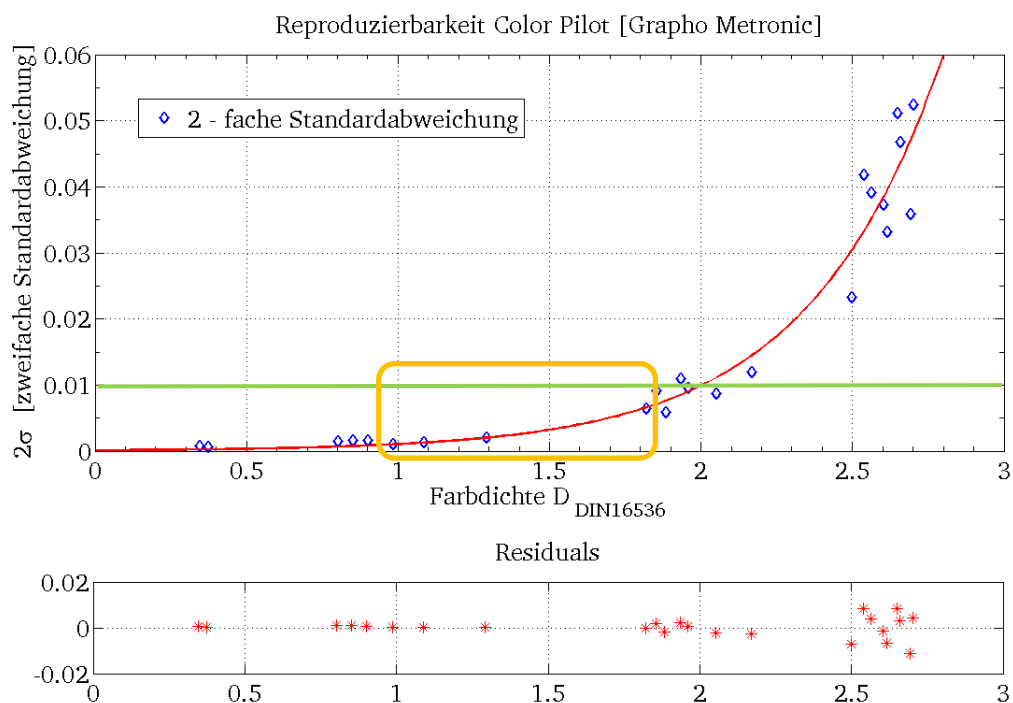


Abbildung 49: Zweifache Standardabweichung 2σ über der Farbdichte D für das Referenzmessgerät fm19. Der gelbe Rahmen stellt den drucktechnisch relevanten Bereich der Farbdichte nach PSO dar [18]. Die grüne Linie steht für die Herstellerangabe der Reproduzierbarkeit [55].

Zielmessgerät: Druckinspektionssystem

Um für Messungen mit dem Druckinspektionssystem einen Kennwert für die Reproduzierbarkeit zu generieren, wurde analog zum Referenzmessgerät vorgegangen. Dazu wurden 100 Wiederholungsmessungen für verschieden große Farbdichten durchgeführt und die zweifache Standardabweichung

chung bestimmt. In Abbildung 50 ist ein approximierter Verlauf der zweifachen Standardabweichung von Messungen der Farbdichte D^*_{DIS} aufgetragen. Um eine Vergleichbarkeit zum Referenzmessgerät gewährleisten zu können, wurde die zweifache Standardabweichung 2σ über der bereits kalibrierten Farbdichte⁸ des Druckinspektionssystems verwendet.

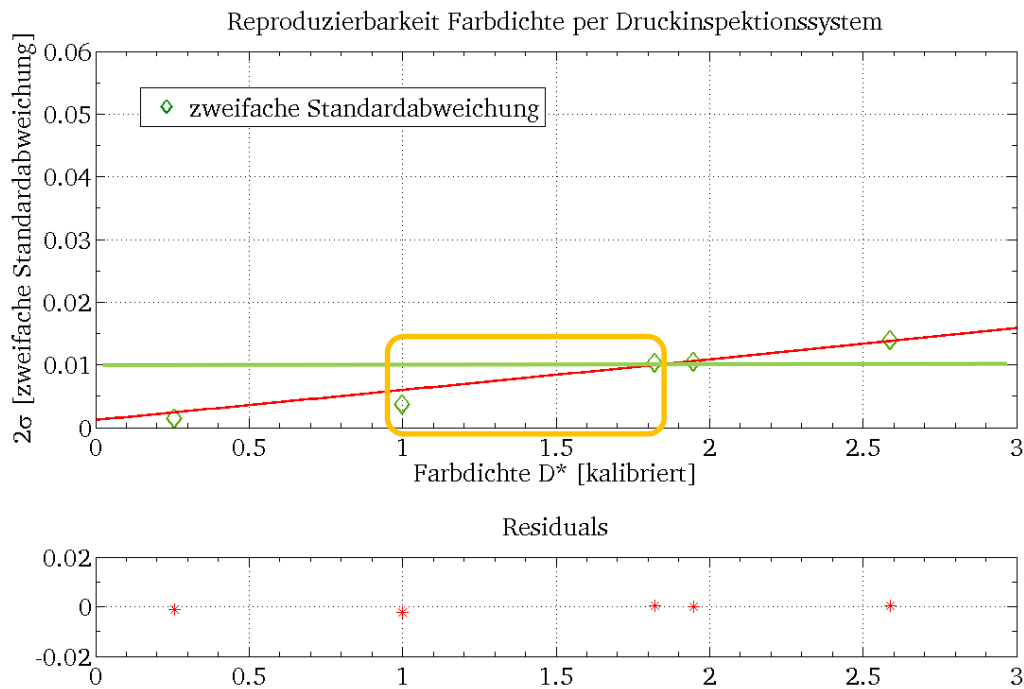


Abbildung 50: Zweifache Standardabweichung 2σ des Messwertes über der kalibrierten Farbdichte des Druckinspektionssystems. Der gelbe Rahmen stellt den drucktechnisch relevanten Bereich der Farbdichte nach PSO dar. Die grüne Linie steht für die Herstellerangabe der Reproduzierbarkeit.

Die zweifache Standardabweichung 2σ der durch das Druckinspektionssystem gemessenen Farbdichte liegt für den drucktechnisch relevanten Bereich zwischen $0,005D^*_{DIS}$ und $0,01D^*_{DIS}$. Auch hier steigt die Standardabweichung 2σ für Messergebnisse hoher Farbdichten durch das schlechter werdende Signal-/Rausch-Verhältnis an.

Damit konnte zum einen gezeigt werden, dass eine Messung der Reproduzierbarkeit mit den Herstellerangaben für das Referenzmessgerät im Rahmen des drucktechnisch relevanten

⁸ Die Umrechnungsfunktion sowie ausführliche Ergebnisse werden in Kapitel 5 gezeigt.

Bereichs der Farbdichte übereinstimmt. Zudem konnte so gezeigt werden, in welcher Größenordnung der Reproduzierbarkeit herkömmliche und etablierte Messgeräte arbeiten. Weiter konnte gezeigt werden, dass die Messung der Farbdichte durch ein Druckinspektionssystem in der gleichen Größenordnung der Reproduzierbarkeit liegt wie etablierte Messgeräte.

4.6 Streulicht und Oberflächenreflexion

Die Umgebung um den Versuchsstand ist vergleichbar hell zu einer Druckerei ausgeleuchtet. Dabei wird eine fluoreszierende Beleuchtung ähnlich der Lichtart D50 eingesetzt. Um einen Einfluss durch Streulicht aus der Umgebung zu verhindern, kann der Raum während der Versuche auf Grund der notwendigen Bedienung nicht verdunkelt werden. Deshalb sind Maßnahmen zur Reduzierung möglicher Streulichteinflüsse getroffen worden. Zum einen sind im Detektionsbereich der Zeilenkamera befindliche Bauteile sowie die optisch relevante Front der Druckmaschine Rotaprint R38a matt schwarz lackiert oder mit schwarzem Velours bezogen worden. Zum anderen ist die in Abbildung 51 dargestellte 60cm lange, mit schwarzem Velours ausgekleidete Streulichtblende vor dem Objektiv der Kamera TVI XIIMUS installiert worden.



Abbildung 51: Streulichtblende vor dem Objektiv der Kamera TVI XIIMUS. Durch Form und Größe sowie der Auskleidung mit schwarzem Velours ist der Einfluss von Streulicht aus der Umgebung sehr gut reduziert.

Weiter gibt es Effekte durch Oberflächenreflexionen von Stellen, die außerhalb der Detektionsstelle der Kamera liegen.

Diese Einflüsse werden ebenfalls von der Kamera detektiert und beeinflussen damit den Messwert, der als Grundlage für eine Berechnung der Farbdichte verwendet wird. Zum einen sind Einflüsse durch gerichtete Direktreflexion an der Oberfläche zu nennen. In Abbildung 52 ist eine Skizze der Messgeometrie in der Druckmaschine Rotaprint R38a dargestellt. Dort ist rechts die Zeilenkamera und links der Gegendruckzylinder skizziert. Die blauen Pfeile zeigen die Direktreflexion an verschiedenen Stellen der Oberfläche. Durch die konkave Oberfläche werden Direktreflexionen in der unmittelbaren Nähe der Messstelle divergent reflektiert und sind unkritisch. Von weiter entfernten Stellen können jedoch Direktreflexionen in das Objektiv der Zeilenkamera treffen.

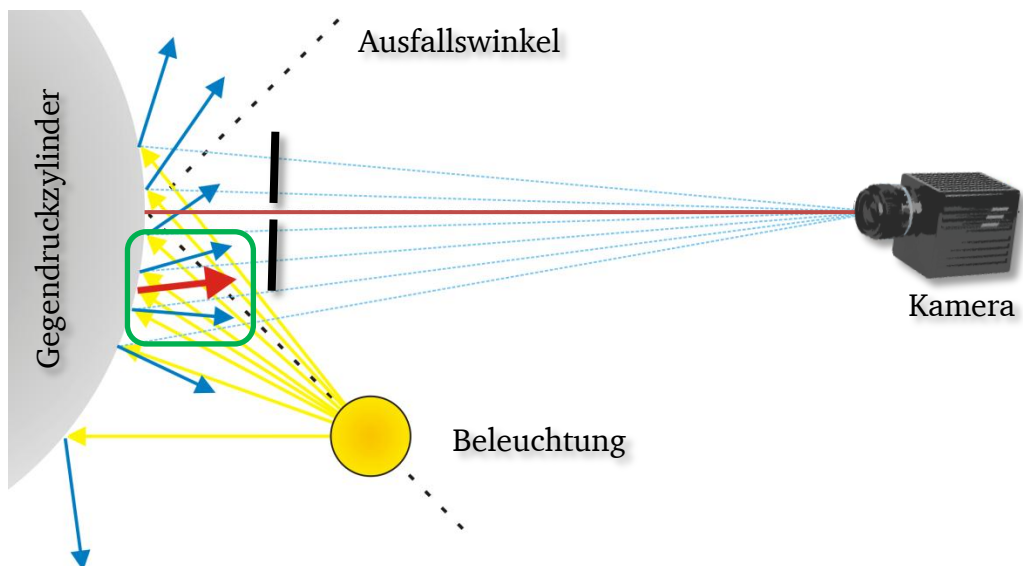


Abbildung 52: Dargestellt ist die Messgeometrie der Messwertaufnahme durch das Druckinspektionssystem. Die blauen Pfeile zeigen mögliche Direktreflexionen an verschiedenen Stellen der Oberfläche. In Rot ist der Anteil messortentfernter Direktreflexion eingezeichnet. Die schwarzen Striche stellen die Blende dar.

Zum anderen treten Einflüsse infolge von diffusen Oberflächenreflexionen auf. In Abbildung 53 sind mögliche Oberflächenstreuungsfunktionen an den vorher eingeführten Stellen dargestellt. Von jeder dieser Stellen aus können Anteile der diffusen Oberflächenreflexion in Richtung des Objektivs der Zeilenkamera treffen.

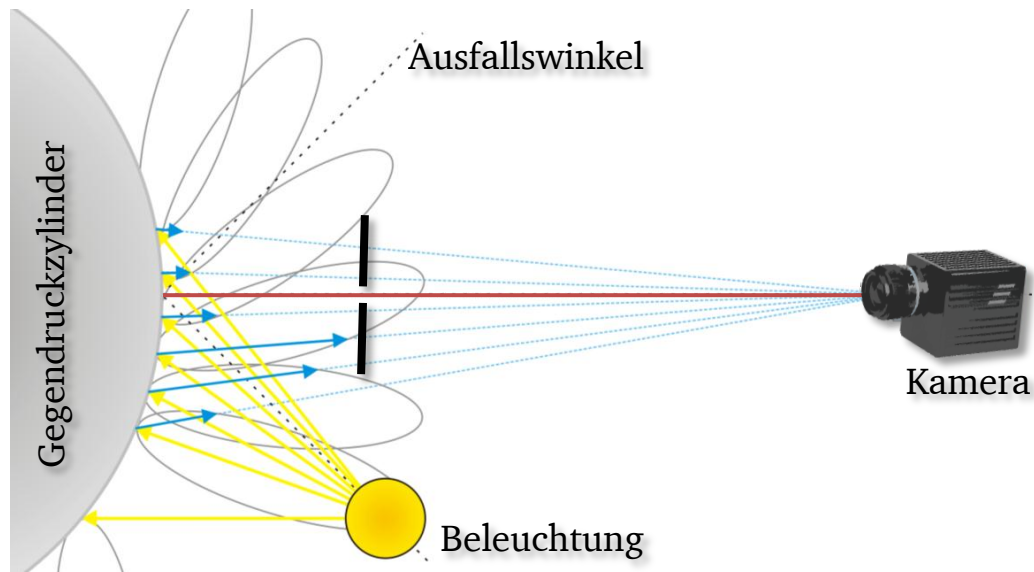


Abbildung 53: Oberflächenreflexion an möglichen Streupunkten außerhalb der Detektionsstelle. Durch diffuse Oberflächenreflexion können von weit von der Detektionsstelle entfernten Stellen aus Reflexionen mitgemessen werden.

Aus diesem Grund wird eine in Abbildung 54 dargestellte Blende vor dem Inspektionsspalt installiert, durch die der Strahlengang der Kamera führt.



Abbildung 54: Hier ist die im Strahlengang der Kamera eingesetzte Blende abgebildet. Streulicht, welches ober und unterhalb des 1mm breiten verbleibenden Spaltes von der Detektionsstelle reflektiert wird, wird durch das verwendete schwarze Velours absorbiert.

Aus mechanischen Gründen ist eine Spaltbreite der Blende kleiner 1mm nicht zu realisieren. Damit ist die Fläche, von der gerichtete oder diffuse Oberflächenreflexion zum Objektiv der Zeilenkamera gelangen kann, nur noch 2,6mm groß⁹. Im Vergleich dazu ist dieser Bereich ohne die Blende 3,5cm groß.

⁹ Berechnung erfolge über einfache optische Abbildung der Einbaugeometrie.

Mit Hilfe dieser Einrichtung kann die gerichtete Oberflächenreflexion von Stellen, die außerhalb der Detektionsstelle liegen, vollständig verhindert werden. Hierbei wird ausschließlich von direkter Oberflächenreflexion ausgegangen.

Der Anteil diffuser Oberflächenreflexion von Stellen außerhalb der Detektionsstelle kann auf diesem Wege nicht vollständig verhindert, jedoch reduziert werden. Insgesamt ist der Anteil der diffusen Oberflächenreflexion, die durch den Einsatz einer Blende reduziert werden kann, gering gegenüber dem Anteil, der durch gerichtete Oberflächenreflexion zur Kamera gelangt. Damit wird deutlich, dass es neben den störenden diffusen Oberflächenreflexionen hauptsächlich wichtig ist, den gerichtet reflektierten Anteil der Oberflächenreflexion zu unterdrücken. Der verbleibende Teil an diffuser Oberflächenreflexion vom Messfeld sowie von den umliegenden Bereichen muss durch die Transformationsfunktion aus Kapitel 3.4 oder in einer Kalibrierung berücksichtigt werden.

4.7 Approximation der Kalibrierfunktion

Ziel ist es aus den gewonnenen Ergebnissen der Messungen eine Kalibrierfunktion $K(x)$ abzuleiten. Dazu wird eine Funktion gesucht, die die Korrelation zwischen den Ergebnissen der Messungen durch das Referenzmessgerät und durch das Druckinspektionssystem abbildet. Wird so eine Funktion gefunden, ist es möglich das Ergebnis einer Messung der Farbdichte D_{DIS}^* in eine normäquivalente Farbdichte $D_D \Leftrightarrow D_{DIS}^*$ umzurechnen. Dadurch, dass die Messungen des Druckinspektionssystems auf normgerecht gemessene und rückführbare Messergebnisse abgebildet werden, ist die über die Kalibrierfunktion umgerechnete Farbdichte rückführbar genau.

4.7.1 Ansatz über die Transformationsfunktion

Um eine Kalibrierfunktion $K(x)$ zu finden, können zwei verschiedene Ansätze verwendet werden. Der eine Ansatz basiert auf der in Kapitel 3 hergeleiteten Transformationsfunktion, die in Gleichung 4.3 abgebildet ist.

$$K(\beta_0, \beta) = \delta \cdot \log_{10} \frac{\beta_{D0} - \rho}{\beta_D - \rho} = D_{D \Leftrightarrow D_{DIS}^*} \quad 4.3$$

Dabei müssen aus Messungen der Farbdichte D durch das Referenzgerät, sowie den gewichteten Reflexionsgraden β_D und β_{D0} (aus denen D_{DIS}^* berechnet werden kann) Werte für die Parameter ρ und δ gefunden werden. Durch den Parameter ρ wird die Oberflächenreflexion korrigiert. Durch δ wird die unterschiedliche Messwertaufnahme der beiden Systeme korrigiert.

Mit Werten für die Parameter ρ und δ kann die kalibrierte und normäquivalente Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D_{DIS}^*}$ berechnet werden. Mit Hilfe der numerischen Lösung aus der Kapitel 3 können Werte für ρ und δ bestimmt werden.

4.7.2 Empirischer Ansatz

Voraussetzung für den zuvor vorgestellten Ansatz ist, dass die gewichteten Reflexionsgraden sowohl für das Volltonfeld β_D , als auch für das Feld der Weißreferenzierung β_{D0} vorliegen müssen. Liegen für die Reflexionswerte β und β_0 keine getrennten Werte vor, sondern nur bereits umgerechnete Werte für D_{DIS}^* , so muss ein anderer Ansatz, als die Transformationsfunktion, gewählt werden. Zudem kann der Ansatz über die Transformationsfunktion nur Einflüsse abbilden, die bei der Modellierung in Kapitel 3 berücksichtigt wurden. Beispielsweise basiert diese Modellierung darauf, dass die Messfläche flach gestaltet ist. Die Oberflächenreflexion auf gekrümmter Oberfläche kann einen Einfluss auf die Umrechnung bzw. die Kalibrierung haben, der bisher nicht berücksichtigt werden konnte. Das Modell der Transformationsfunktion kann jedoch nicht einfach um den oben genannten Effekt erweitert werden, da die besondere Messgeometrie des Druckinspektionssystems nicht mit herkömmlichen Spektralphotometern nachbildbar ist.

Somit ist mit Gleichung 4.4 ein zweiter, physikalisch nicht begründbarer und daher voll empirische Ansatz entwickelt wor-

den. Die Annahmen basieren auf Voruntersuchungen des Zusammenhangs zwischen D und D_{DIS}^* . Grundlage für diesen Ansatz war die Verteilung der korrelierten Ergebnisse der Kalibriermessungen. Der Ansatz wurde in einer Studienarbeit von SCHUNDA näher untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass der Ansatz die Kalibrierfunktion für die betrachteten Materialkombinationen sehr gut abbildet [109]. Dieser Ansatz setzt sich aus einem linearen und einem exponentiellen Term zusammen.

$$K(D_{DIS}^*) = a_1 \cdot D_{DIS}^* + a_2 \cdot e^{a_3 \cdot D_{DIS}^*} = D_{D \Leftrightarrow D_{DIS}^*} \quad 4.4$$

4.8 Kalibrierfunktionen

Nachdem die Vorgehensweise für die Kalibrierung sowie die dafür eingesetzten Messgeräte vorgestellt wurden, werden in diesem Unterkapitel die erzielten Ergebnisse dargestellt. Dazu werden zunächst Korrelationen zwischen normgerecht erstellten Messungen der Farbdichte D , der Kalibrierbogen und Ergebnisse der gerätespezifischen Farbdichte D_{DIS}^* , die durch das Druckinspektionssystem gemessen wurde, gezeigt. Dabei werden Ergebnisse und Einflüsse für Druckfarben und verschiedene Bedruckstoffe gezeigt. Im Anschluss werden durch die vorgestellten Ansätze Kalibrierfunktionen in Abhängigkeit der Materialkombinationen berechnet.

4.8.1 Kalibrierfunktion abhängig von der Druckfarbe

Entsprechend der Kalibriervorschrift ist die Farbdichte D der Volltonfelder auf den Kalibrierbogen mittels des Referenzmessgerätes rückführbar gemessen worden. Anschließend ist die gerätespezifische Farbdichte D_{DIS}^* aus Messungen derselben Volltonfelder durch das Druckinspektionssystem bestimmt worden. Um für D_{DIS}^* einen Ausdruck in Abhängigkeit von D zu erhalten, ist in Abbildung 55 D_{DIS}^* über D aufgetragen.

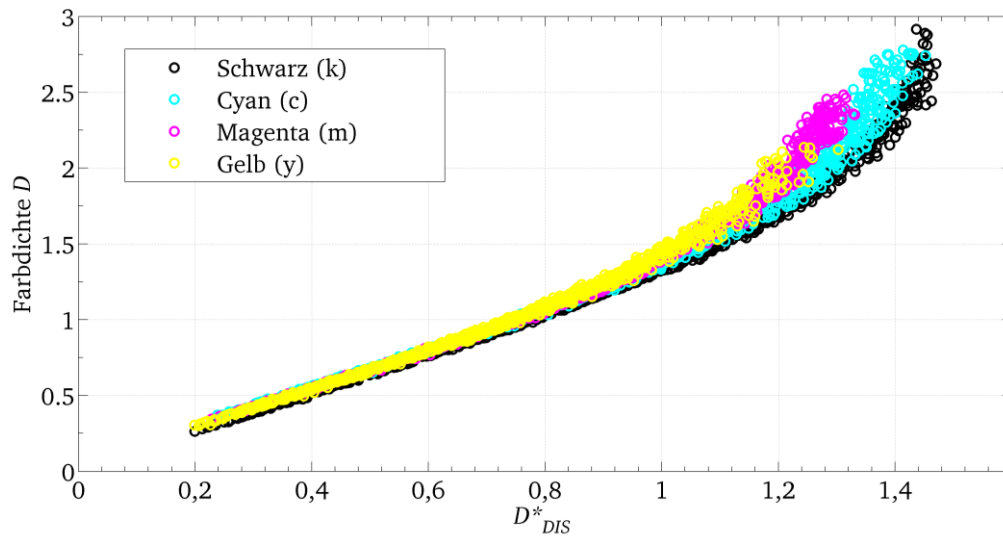


Abbildung 55: Aufgetragen ist die normgerechte Farbdichte D der vier Druckfarben über der Farbdichte D^*_{DIS} , die mit dem Druckinspektionssystem gemessen wurden. Die Kalibrierbogen bestehen aus einem glatten Bedruckstoff.

Der allgemeine Verlauf der Messdaten entspricht den Untersuchungen aus Kapitel 3. Das bedeutet, dass der Messwert der Farbdichte D stetig größer als der Wert der Farbdichte D^*_{DIS} ist. Dieses Verhalten wurde durch die unterschiedlichen spektralen Eigenschaften der Baugruppen bzw. allgemein durch die differierende Messwertaufnahme eines normgerechten Messsystems zu der des Druckinspektionssystems in Kapitel 3 gezeigt. Weiter steigt die Farbdichte D mit zunehmender Farbschichtdicke schneller, als der Wert der Farbdichte D^*_{DIS} . Dies ist darauf zurück zu führen, dass Messungen von D^*_{DIS} ohne Polarisationsrichtung durchgeführt werden.

Zudem ist mit zunehmender Farbdichte die Auftragung von der Druckfarbe abhängig. Für steigende Werte von D für Gelb bleiben die Werte von D^*_{DIS} kleiner als für Magenta, Cyan oder Schwarz. Auch dies ist auf die unterschiedlichen Kombinationen der in Kapitel 3.2 dargestellten Erregungsspektren und Kanalempfindlichkeiten des verwendeten Druckinspektionssystems zurückzuführen. Je stärker die Anregung und höher die Empfindlichkeit der Kamera im berücksichtigten Bereich des Spektrums ist, desto kleiner sind die resultierenden Farbdichten. Für eine Berechnung der Farbdichte D^*_{DIS} für die Druckfarbe Gelb wird der Blau-Kanal der Kamera verwendet.

Im Blau-Kanal der Zeilenkamera ist die Anregung durch das verwendete Leuchtmittel am höchsten. Daraus resultieren kleinere Werte für D^*_{DIS} , die aus diesem Kanal berechnet werden (vgl. Kapitel 2.2.3, 3.2 und 3.3).

Die Korrelation zwischen Werten von D und den real mit dem Druckinspektionssystem gemessenen Werten von D^*_{DIS} verhält sich damit entsprechend den simulierten Untersuchungen aus Kapitel 3, die nicht alle Unterschiede in der Messwertaufnahme berücksichtigen konnte.

4.8.2 Kalibrierfunktion abhängig vom Bedruckstoff

Basierend auf den Erkenntnissen über die Oberflächenreflexion aus Kapitel 3 muss der Bedruckstoff einen Einfluss auf das Kalibrierergebnis haben. Um dies mit in das Ergebnis der Kalibrierung aufnehmen zu können, sind entsprechend der Kalibriervorschrift für verschieden Bedruckstoffe Werte für D und D^*_{DIS} aufgenommen worden. Als ein Ergebnis dieser Messungen ist in Abbildung 56 D über D^*_{DIS} für je einen rauhen, matten und einen glatten, glänzenden Bedruckstoff aufgetragen. Da auf dem rauhen, matten Bedruckstoff keine Farbdichten $D > 1,5$ druckbar waren, liegen für diesen Bereich der Farbdichte keine Messwerte vor.

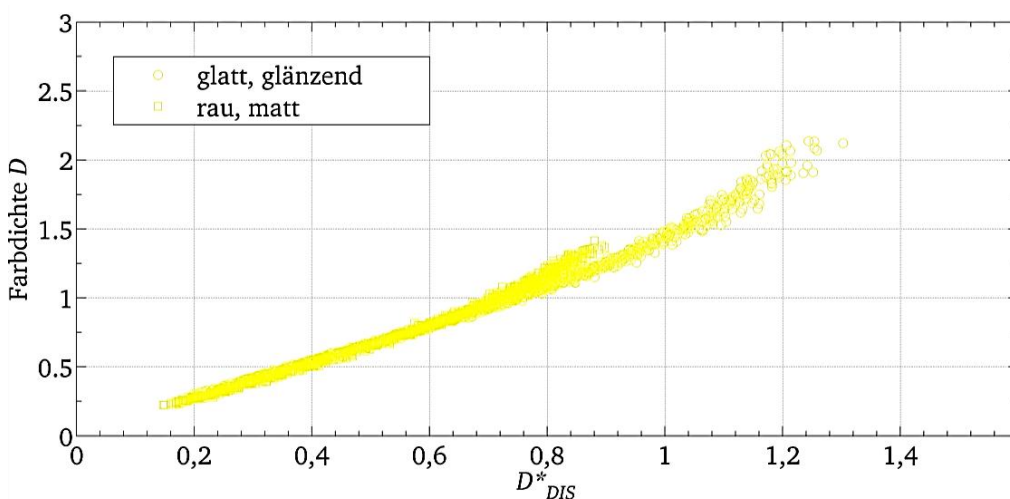


Abbildung 56: Aufgetragen ist die Farbdichte D über D^*_{DIS} für einen rauhen, matten (\square) und einen glatten, glänzenden Bedruckstoff (\circ).

Es ist ein Einfluss der Bedruckstoffoberfläche auf das Ergebnis der korrelierten Ergebnisse zu erkennen. Dies stimmt mit den Untersuchungen aus Kapitel 3 überein. Dort wurde gezeigt, dass Messungen der Farbdichte, die ohne Polarisationsrichtung durchgeführt werden, abhängig von der Oberflächenreflexion sind. Richtung und Betrag des Anteils der Oberflächenreflexion sind damit abhängig von der Bedruckstoff- und Druckfarbenoberfläche. Anschaulich bedeutet das, dass ein rauher Bedruckstoff mehr oberflächenreflektiertes Licht in Richtung des Detektors bzw. der Kamera reflektiert. Durch die negativ logarithmische Berechnung der Farbdichte resultiert hieraus ein niedrigerer Wert der Farbdichte. Somit ist für einen gleichen Wert der Farbdichte D ein kleinerer Wert der Farbdichte D^*_{DIS} für eine rauhen Bedruckstoff zu erwarten, als für einen glatten, glänzenden Bedruckstoff. Genau dieses Verhalten ist in Abbildung 56 zu erkennen.

Zur besseren Übersicht und zum Beweis der Übertragbarkeit auf die anderen Druckfarben sind in Abbildung 57 in jedem Quadranten die Farbdichte D über der Farbdichte D^*_{DIS} für die jeweilige Druckfarbe aufgetragen.

Dabei werden Messungen für einen glatten, glänzenden Bedruckstoff durch das Zeichen \circ und für einen rauhen, matten Bedruckstoff durch das Zeichen \square dargestellt. Es ist für die Druckfarben Cyan (1), Magenta (2), Gelb (3) und Schwarz (4) ein eindeutiger Einfluss durch die Variation des Bedruckstoffes zu erkennen. Damit wird gezeigt, dass der Einfluss des Bedruckstoffes für alle Druckfarben nachweisbar ist. Dieser ist jedoch in Abhängigkeit von der gedruckten Druckfarbe unterschiedlich stark geprägt.

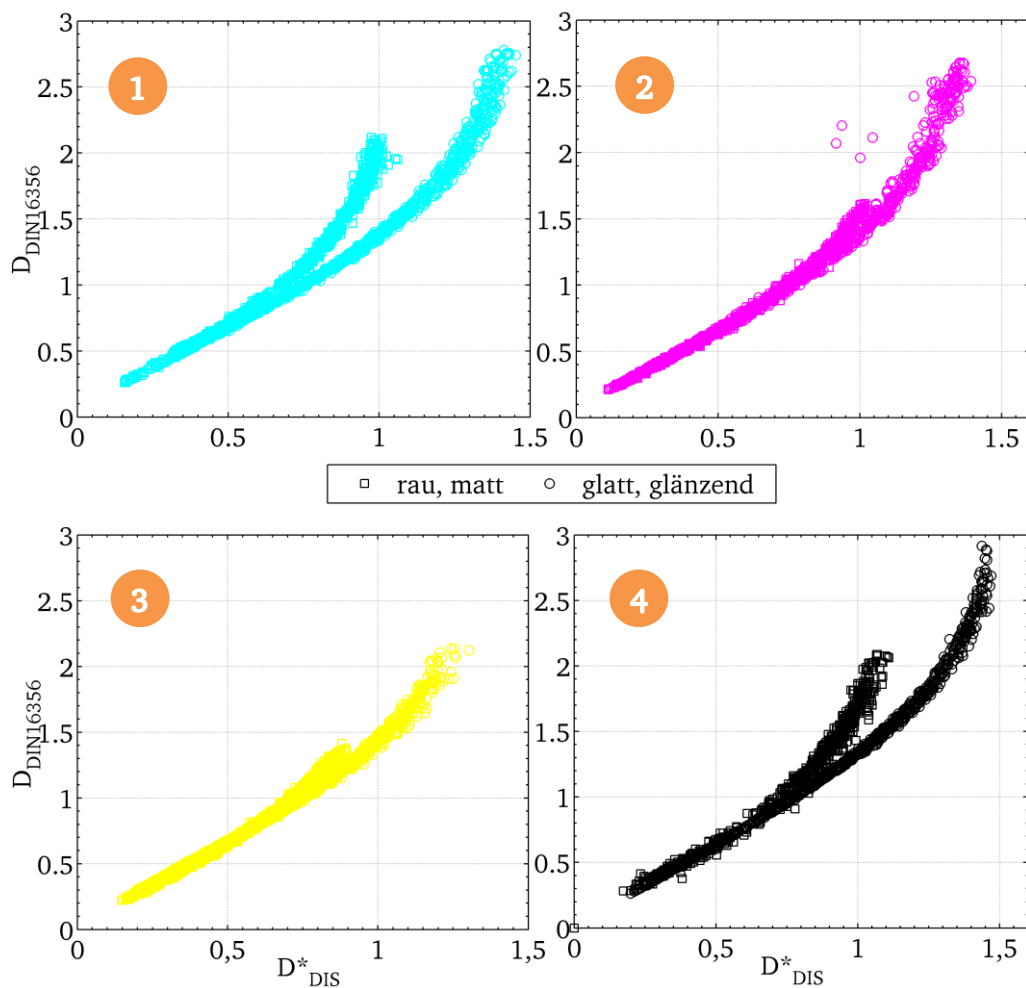


Abbildung 57: Aufgetragen ist jeweils für die vier Druckfarben Cyan (1), Magenta (2), Gelb (3) und Schwarz (4) der Kalibrierbogen die Farbdichte D über der Farbdichte D^*_{DIS} . In jedem Diagramm ist die Auftragung für einen rauhen und einen glatten Bedruckstoff dargestellt.

Dies ist zum einen auf die Oberflächeneigenschaften der verschiedenen Materialkombinationen zurückzuführen. Abhängig von der Rauheit des Bedruckstoffes, aber auch von Faktoren wie der Zügigkeit oder der Wegschlagfähigkeit der Druckfarbe, können sich unterschiedliche Oberflächenstrukturen der Druckfarbe ausbilden. Zum anderen sind wie zuvor dargestellt, die Empfindlichkeit der Kamerakanäle und ebenfalls die Erregung über das Spektrum zur Bestimmung von D^*_{DIS} unterschiedlich. Damit kann abhängig von der Druckfarbe und des Bedruckstoffes ein unterschiedlich großer Anteil an Oberflächenreflexion unterschiedlich stark detektiert werden.

4.8.3 Approximieren der Kalibrierfunktion

Ansatz: Transformationsfunktion

Entsprechend der vorgestellten Ansätze, sind Approximationen der Kalibrierfunktion $K(x)$ durchgeführt worden. Zunächst wird ein Ergebnis für den Ansatz mittels der Transformationsfunktion gezeigt. Als Ergebnis für einen glatten, glänzenden Bedruckstoff sind Werte für $\rho = 0,043$ und $\delta = 1,216$ berechnet worden. Mit diesen Parameterwerten und der Kalibrierfunktion $K(x)$ aus Gleichung 4.3, können die Werte für D^*_{DIS} korrigiert und in eine normäquivalente, kalibrierte Farbdichte $D^*_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$ umgerechnet werden. In Abbildung 58 ist einmal in Rot die Korrelation zwischen D und D^*_{DIS} und in Schwarz das Ergebnis die Kalibrierfunktion aufgetragen.

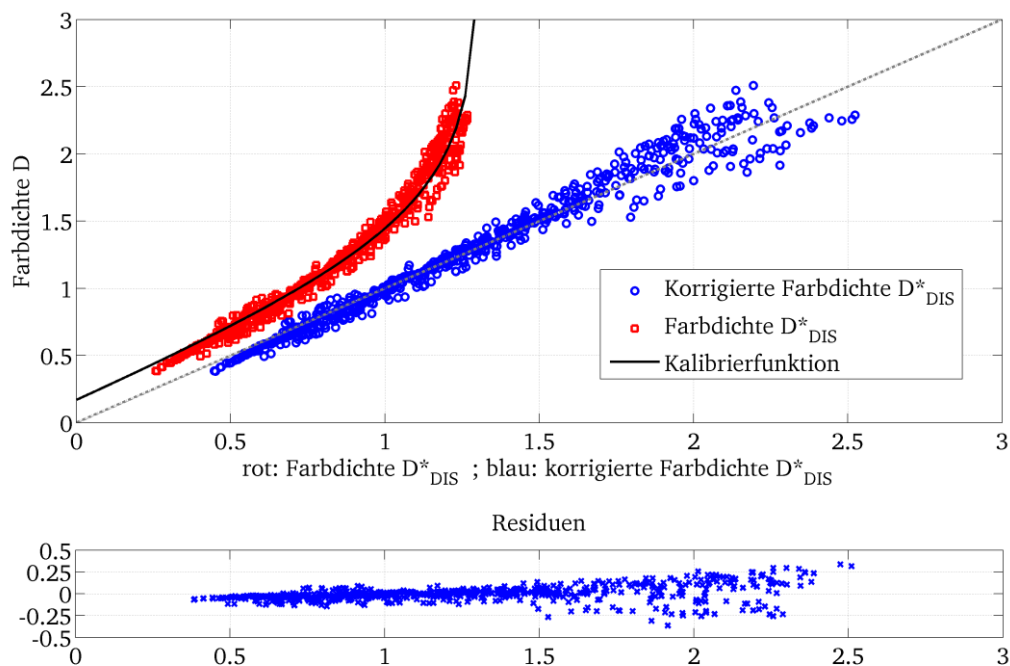


Abbildung 58: In Rot ist D über D^*_{DIS} aufgetragen. In Blau ist D über der normäquivalenten Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$ aufgetragen. Die dargestellten Residuen entsprechen der Restabweichung der normgerecht gemessenen Farbdichte D von der normäquivalenten Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$.

Die Auftragung der blauen Daten beschreibt die normgerecht gemessene Farbdichte D über die durch die gefundene Kalibrierfunktion berechneten Werte der normäquivalenten Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$. Die aufgetragenen Residuen beschreiben

die Restabweichung der Werte der normäquivalenten Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$ von normgerecht gemessenen Werten der Farbdichte D .

Die gleichmäßige Verteilung der Residuen um den Nullpunkt zeigt, dass die gefundenen Werte der Parameter ρ und δ den für den auf der Transformationsfunktion basierenden Ansatz bis zu einer Farbdichte $D = 1,8$ sehr gut beschreiben.

$$RMSE(f, g) = \sqrt{E\{(f(x) - g)^2\}} \quad 4.5$$

Die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung ist nach Gleichung 4.5 definiert [117]. Dazu wird die Wurzel aus dem Mittelwert der Differenz zwischen einem Funktionswert $f(x)$ und dem Messwert g gebildet. Je näher der Wert des $RMSE$ an Null ist, desto besser bildet $f(x)$ die Messwerte g ab. Für die Approximation der Kalibrierfunktion ist $RMSE = 0,089$ und damit klein. Da die Eingangsdaten für die Approximation für Werte $D > 1,8$ stark streuen, kann für diesen Bereich keine bessere Abbildung gefunden werden.

Ansatz: Empirisch

Für eine Approximation der Kalibrierfunktion $K(x)$ über den in Kapitel 0 erläuterten empirischen Ansatz, ergeben sich für den glatten, glänzenden Bedruckstoff für die Parameter Werte von $a_1 = 1,33$, $a_2 = 5,45 \cdot 10^{-4}$ und $a_3 = 5,618$. Mit diesen Parameterwerten und der Kalibrierfunktion $K(x)$ aus Gleichung 4.4 können die Werte für D^*_{DIS} korrigiert und in eine normäquivalente Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$ umgerechnet werden. In Abbildung 59 ist in Rot die Korrelation zwischen der normgerecht gemessenen Farbdichte D und D^*_{DIS} , sowie in Schwarz die ermittelte Kalibrierfunktion auf Basis des empirischen Ansatzes aufgetragen.

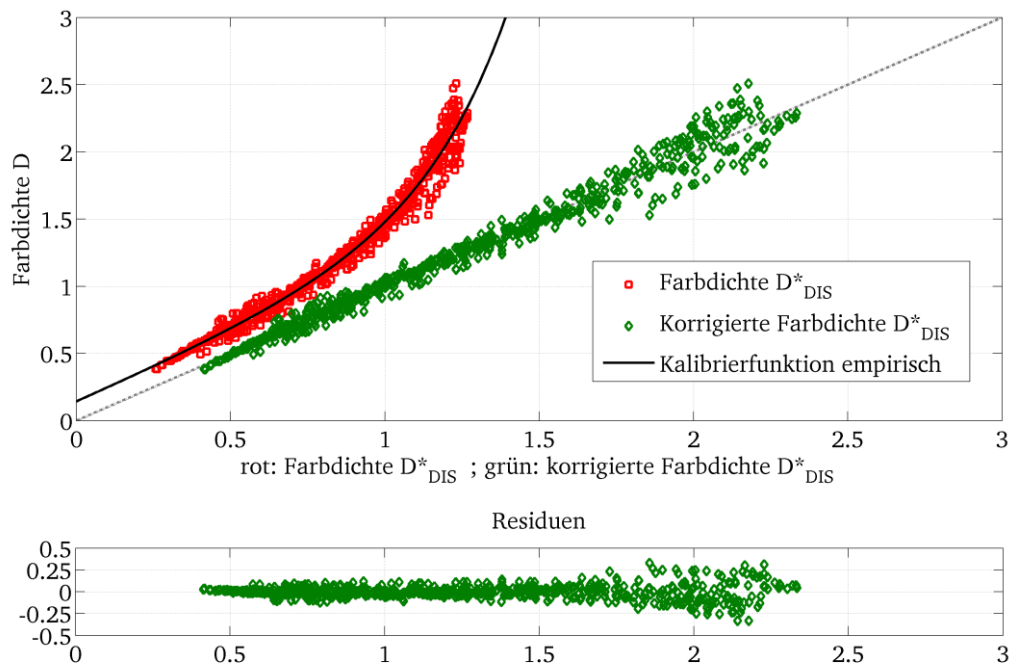


Abbildung 59: In Rot ist D über D^*_{DIS} für einen glatten, glänzenden Bedruckstoff aufgetragen. In Grün ist D über der normäquivalenten Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$ aufgetragen. Zur Umrechnung wurde die auf dem empirischen Ansatz basierende Kalibrierfunktion verwendet. Die dargestellten Residuen entsprechen der Restabweichung der normgerecht gemessenen Farbdichte D von der normäquivalenten Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$.

Die Datenpunkte in Grün repräsentieren die Korrelation zwischen der normgerechten Farbdichte D und der normäquivalenten Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$ dar. Die aufgetragenen Residuen stellen die Restabweichung zwischen der normgerechten Farbdichte D und der normäquivalenten Farbdichte $D_{D \Leftrightarrow D^*_{DIS}}$. Anhand der gleichmäßigen Verteilung der Residuen um den Nullpunkt ist nachweisbar, dass die bestimmten Werte für die Parameter a_1 , a_2 und a_3 des empirischen Ansatzes eine sehr gute Approximation der Kalibrierfunktion beschreiben. Die Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung beträgt $RMSE = 0,079$ und zeigt damit eine präzise Abbildung der Kalibrierfunktion. Auch der empirische Ansatz für die Approximation der Kalibrierfunktion liefert für Werte der Farbdichte $D > 1,8$ eine schlechtere Abbildung als für kleinere Werte der Farbdichte. Trotzdem bildet diese Approximation die Werte für Farbdichten $D > 1,8$ geringfügig besser ab als der Ansatz der auf der Transformationsfunktion basiert. Dies ist neben

den Residuen, die für den empirischen Ansatz bei Farbdichten $D > 1,8$ gleichmäßiger um den Nullpunkt streuen auch durch den kleineren Wert der Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung zu sehen. Erklärbar ist dies damit, dass der empirische Ansatz physikalisch nicht realisierbare Werte für hohe Farbdichten abbilden kann. In Abbildung 60 sind die beiden gefundenen Kalibrierfunktionen dargestellt.

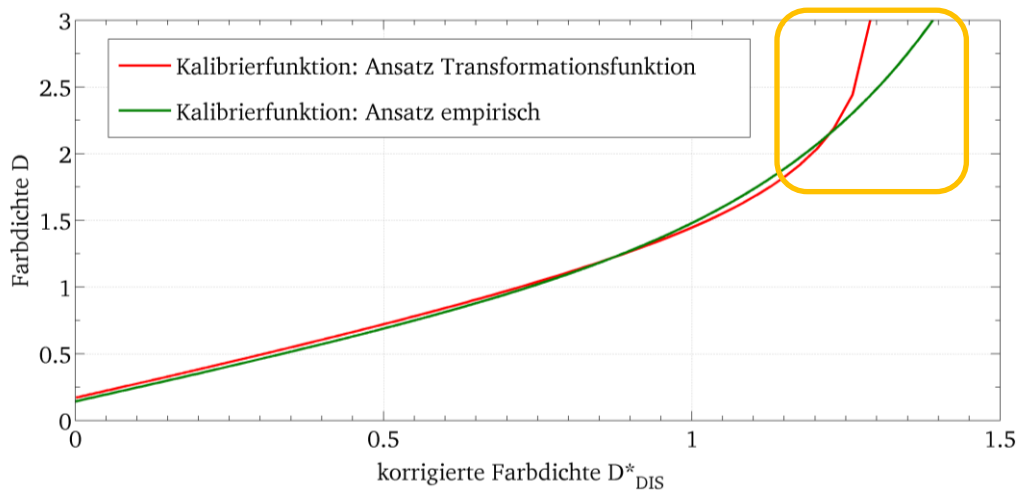


Abbildung 60: Vergleich der ermittelten Kalibrierfunktionen. Rot repräsentiert die mittels Transformationsfunktion gefundene Kalibrierfunktion. Grün stellt die über den empirischen Ansatz ermittelte Kalibrierfunktion dar.

Die rote Funktion resultiert aus dem Ansatz der Transformationsfunktion. In Grün ist die Lösung für die Kalibrierfunktion mittels des empirischen Ansatzes abgebildet. Für Farbdichten $D > 2$ ist zu erkennen (gelber Rahmen), dass die grüne Funktion deutlich flacher als die rote Funktion verläuft. Dieser flache Verlauf scheint den Bereich von Farbdichten $D > 2$ besser abzubilden. Das Modell der Transformationsfunktion, kann diesen Bereich nicht so gut abbilden, da dieser Ansatz im Gegensatz zum empirischen Ansatz einen Grenzwert für D^*_{DIS} hat. Für einem Reflexionswert $\beta = 0$ der Druckfarbe ist der Ansatz über die Transformationsfunktion nicht definiert¹⁰. Dieser Grenzwert ist physikalisch logisch und korrekt. Durch die starke Streuung der korrelierten Messwerte für Farbdich-

¹⁰ $\beta = 0$ bedeutet die Division durch 0 nach Ansatzfunktion.

ten $D > 2$ ist der Parameter ρ zu groß bestimmt worden. Dadurch wird der Grenzwert in Richtung des Nullpunktes verschoben und somit Farbdichten $D > 2$ schlechter beschrieben. Es gibt somit keinen Einwand gegen die physikalische Korrektheit des Ansatzes. Da dieser Bereich der Farbdichte $D > 2$ zudem drucktechnisch unwichtig ist, wurde somit auf eine weitere Optimierung des Algorithmus verzichtet. Mit Hilfe des empirischen Ansatzes können die Korrelationen sämtlicher Materialkombinationen abgebildet werden und damit Kalibrierfunktionen in Abhängigkeit der Materialkombination gefunden werden.

4.9 Zusammenfassung und Fazit

In Kapitel 4 wurde basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 3 eine Methode entwickelt, mit der eine Kalibrierung des Druckinspektionssystems auf ein Referenzmessgerät möglich ist. Dazu wurde in der mechanischen Umsetzung ein Versuchsstand erstellt, mit dem die Erfassung der Daten, die für die Erstellung der Kalibrierfunktion notwendig sind, in ausreichender Präzision möglich sind.

Weiter konnte gezeigt werden, dass für die Erstellung der Kalibrierfunktion als Ansatzfunktion neben der Transformationsfunktion aus Kapitel 3 ein weiterer Ansatz, der über eine empirische Begründung Geltung findet, sehr gute Ergebnisse bietet. Es konnten Kalibrierfunktionen in Abhängigkeit von Bedruckstoff und Druckfarbe bestimmt werden.

5 Farbdichtemessung druckfrischer Farben

Nachdem bisher gezeigt wurde, dass eine Messung der Farbdichte sowie die Umrechnung in eine normäquivalente Farbdichte mit einem Druckinspektionssystem möglich ist, soll in diesem Kapitel der Einfluss der druckfrischen Farbe auf die Messwerterfassung dargestellt werden. Da bekannt ist, dass der Messwert der Farbdichte während der Trocknungszeit einer Änderung unterlegen ist, wird zuerst eine Methode zur Messung der Farbdichte während der Trocknung vorgestellt. Im Anschluss werden grundlegende Untersuchungen der vorgestellten Messmethode gezeigt. Auf Basis dieser Untersuchungen wird ein Modell hergeleitet, welches die Änderung der Farbdichte während der Trocknungszeit beschreibt.

5.1 Ergebnis normgerechter Messungen

Aus der praktischen Anwendung aber auch aus Literaturangaben ist bekannt, dass sich der Messwert der Farbdichte während der Trocknung der Druckfarbe ändert [6, 45]. Ebenfalls kann sich der wahrnehmbare optische Eindruck der Farbe und damit auch die Farbdichte ändern. Dies ist vorrangig abhängig von der Druckfarbe, der Schichtdicke und den Eigenschaften des Bedruckstoffes. Obwohl durch Messgeometrie und Polarisationsanordnung im normgerechten Aufbau eines Densitometers der Einfluss einer Messwertänderung der Farbdichte D verhindert werden soll, tritt er real auf. Dieses ist durch Messungen der Farbdichte mittels des in Kapitel 4.4.1 beschriebenen Referenzmessgerätes in Abbildung 61 belegbar.

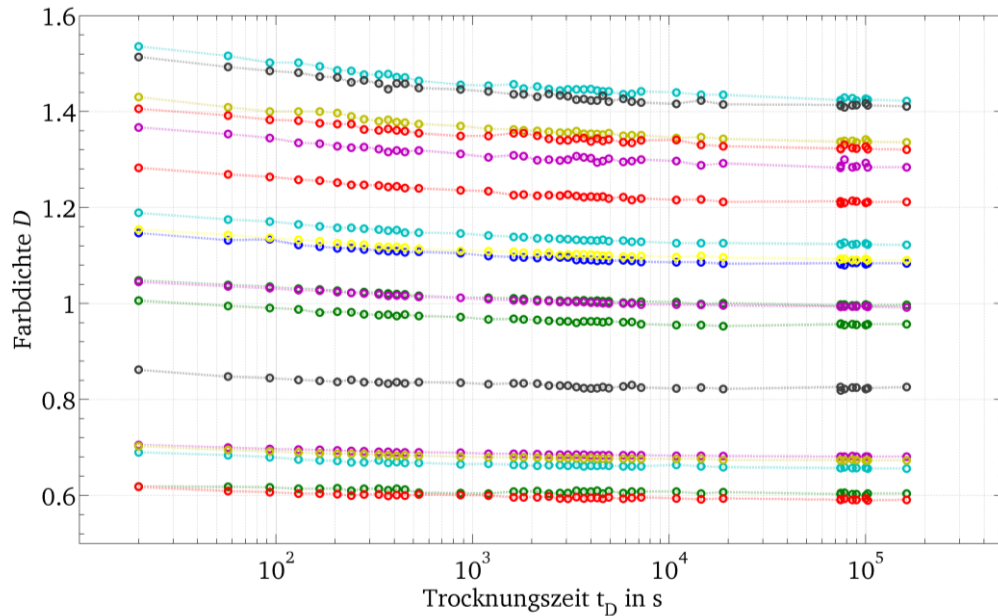


Abbildung 61: Normgerechte Messung der Farbdichte D während der Trocknungszeit t_D . Gedruckt wurde Cyan in verschiedenen Schichtdicken auf ungestrichenem Bedruckstoff. Die Farbdichte D fällt über der Trocknungszeit t_D mit zunehmendem Gradienten bei steigender Schichtdicke ab.

Hier wurde ein frisch bedruckter Bogen ungestrichenen Papiers gleichzeitig mit verschiedenen Schichtdicken der Druckfarbe Cyan bedruckt. Ca. 20s nach Farbauftrag wurde der erste Messwert mittels des normgerecht aufgebauten Densitometers aufgenommen. Weitere Messwerte wurden in größer werdenden zeitlichen Abständen über mehrere Tage aufgenommen. Es ist zu erkennen, dass die Größe der Gesamtänderung des Messwertes der Farbdichte D während der Trocknungszeit abhängig von der aufgetragenen Schichtdicke ist.

Unklar ist der Einfluss der Trocknung der Druckfarbe auf den Wert der per Druckinspektionssystem gemessenen Farbdichte D^*_{DIS} . Bedingt durch die Inline-Messung erfolgt die Messwertaufnahme zum einen nach einer Verweilzeit der Druckfarbe auf dem Substrat t_{verw} , die deutlich kleiner als 20s ist. Zum anderen werden für eine Messung per Druckinspektionssystem keine zusätzlichen Maßnahmen zur Reduktion von Oberflächenreflexionen, wie beispielsweise Polarisationsrichtungen verwendet. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel eine Methode gezeigt die es erlaubt Einflüsse und die Grö-

ßenordnung der Einflüsse der Trocknung auf den Messwert der per Druckinspektionssystem gemessenen Farbdichte D_{DIS}^* (t) zu beschreiben.

5.2 Trocknungszeiten bis zum Messzeitpunkt

Eine Bogenoffsetdruckmaschine besteht aus mehreren Druckwerken. In der Darstellung in Abbildung 62 ist beispielsweise eine Konfiguration mit vier Druckwerken zu sehen. Die Druckfarbe wird sequenziell auf die Bogen übertragen. An jedem Druckwerk wird eine der Druckfarben CMYK gedruckt. Erst nach Auftrag aller vier Druckfarben erfolgt die Druckinspektion als Inline-Messung hinter dem letzten Druckwerk (roter Pfeil). Damit ergeben sich zum Zeitpunkt der Druckinspektion unterschiedliche Trocknungszeiten für jede Druckfarbe. Im Detail ist die schwarze¹¹ Druckfarbe zum Zeitpunkt der Messung länger auf dem Bedruckstoff als die gelbe Druckfarbe.

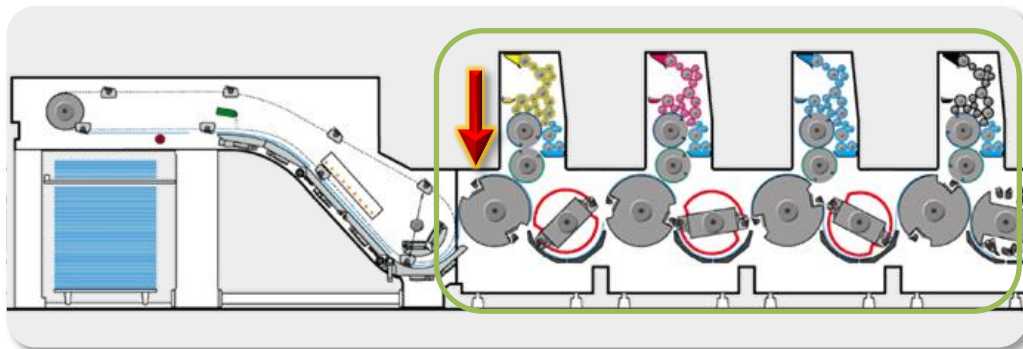


Abbildung 62: Aufbau einer Bogendruckmaschine mit Wendung im Schnitt. Hier als Beispiel die R700 der manroland AG [84]. Der Farbauftrag (grüner Kasten) erfolgt sequenziell von rechts nach links in der Reihenfolge Schwarz, Cyan, Magenta und Gelb. Links neben dem grünen Kasten ist der Ausleger dargestellt. Die Detektionsstelle des Druckinspektionssystems ist durch den roten Pfeil gekennzeichnet.

Anhand der Geometrie und Produktionsgeschwindigkeit lässt sich die Trocknungszeit der jeweiligen Druckfarbe bis zum Zeitpunkt der Messung bestimmen. In Abbildung 63 ist in Rot die Strecke S_{NIP} zwischen der Farbauftragung (Druckspalt oder

¹¹ In der Regel werden die Druckfarben in der Reihenfolge: Schwarz, Cyan, Magenta und abschließend Gelb gedruckt.

Nip) und der Detektionsstelle der Kamera eingezeichnet. Bei einer manroland R700 beträgt S_{NIP} beispielsweise 223mm. Damit ergibt sich bei einer angenommenen Produktionshöchstgeschwindigkeit von 18000 Bogen/h¹² [84] eine Zeit t_{NIP} zwischen Druckfarbenauftrag des letzten Druckwerkes und der Detektion von ca. $t_{NIP} = 55\text{ms}$.

Zwischen den Druckwerken muss der Bogen transportiert werden, um am folgenden Druckwerk bedruckt werden zu können. Diese Transportzeit wird mit t_{trans} bezeichnet. Die Transportzeit t_{trans} eines Bogens vom Nip eines Druckwerkes zum nächsten beträgt unter der angenommen Höchstgeschwindigkeit von 18000 Bogen/h ungefähr 0,45s.

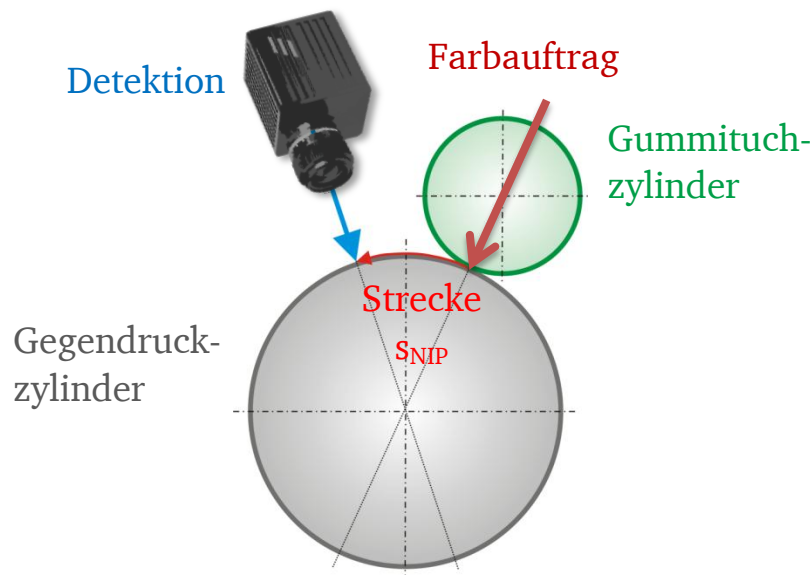


Abbildung 63: Strecke S_{NIP} zwischen Farbauftrag und Detektionsstelle. Während der Drehung der Zylinder um die Strecke S_{NIP} vergeht die Zeit t_{NIP} .

Um die Trocknungszeit t_D einer Druckfarbe zum Zeitpunkt der Druckinspektion bestimmen zu können, muss zu der Zeit t_{NIP} die jeweilige Transportzeit t_{trans} zwischen den Druckwerken addiert werden. Diese ist abhängig von der Anzahl der verwendeten Druckwerke in der Druckmaschinenkonfiguration.

$$t_D = i \cdot t_{trans} + t_{NIP} \quad 5.1$$

¹² Aktuelle Produktionsgeschwindigkeit von Mittelformatdruckmaschinen wie beispielsweise einer manroland R700. Der Trend geht zu höheren Geschwindigkeiten.

Wird eine Druckmaschinenkonfiguration für den normalen Vierfarbdruck angenommen (vier Druckwerke $\Rightarrow i = 4$), liegt die Trocknungszeit der Druckfarbe auf dem Bedruckstoff t_D zwischen 55ms und 1,4s bevor der Messwert inline durch das Druckinspektionssystem aufgenommen wird.

5.3 Methode zur Untersuchung der Farbdichte während der Trocknung

Bislang gibt es kein Verfahren oder eine einheitliche Methode, mit der die Farbdichte während der Trocknungszeit bestimmt oder analysiert werden kann. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit eine solche Methode entwickelt und umgesetzt.

Mit der zu entwickelnden Methode soll eine Messung der Farbdichte eines Prüflings in einem flexibel großen Zeitfenster während Trocknungszeit und nach sehr kurzer Verweilzeit vor der ersten Messung ermöglicht werden. Aufgrund der praxisrelevanten Trocknungszeiten, bedeutet das, dass die erste Messung wenige Millisekunden nach Auftrag der Druckfarbe auf den Bedruckstoff ebenso möglich ist, wie weitere Messungen während mehrerer Stunden nach Farbauftrag. Zudem soll der Farbauftrag möglichst nahe an der real eingesetzten Technologie des Offsetdruckes sein.

Um dies zu erreichen, soll für die Untersuchungen eine modifizierte handelsübliche Bogenoffsetdruckmaschine verwendet und mit der Druckinspektionsanlage ausgestattet werden. Die Modifikation der Druckmaschine ermöglicht es, einen auf dem sich kontinuierlich rotierenden Gegendruckzylinder fixierten Bedruckstoff einmalig zu bedrucken.

In Abbildung 64 ist dieser Ablauf und in Abbildung 65 die mechanische Umsetzung dieses Vorganges dargestellt.

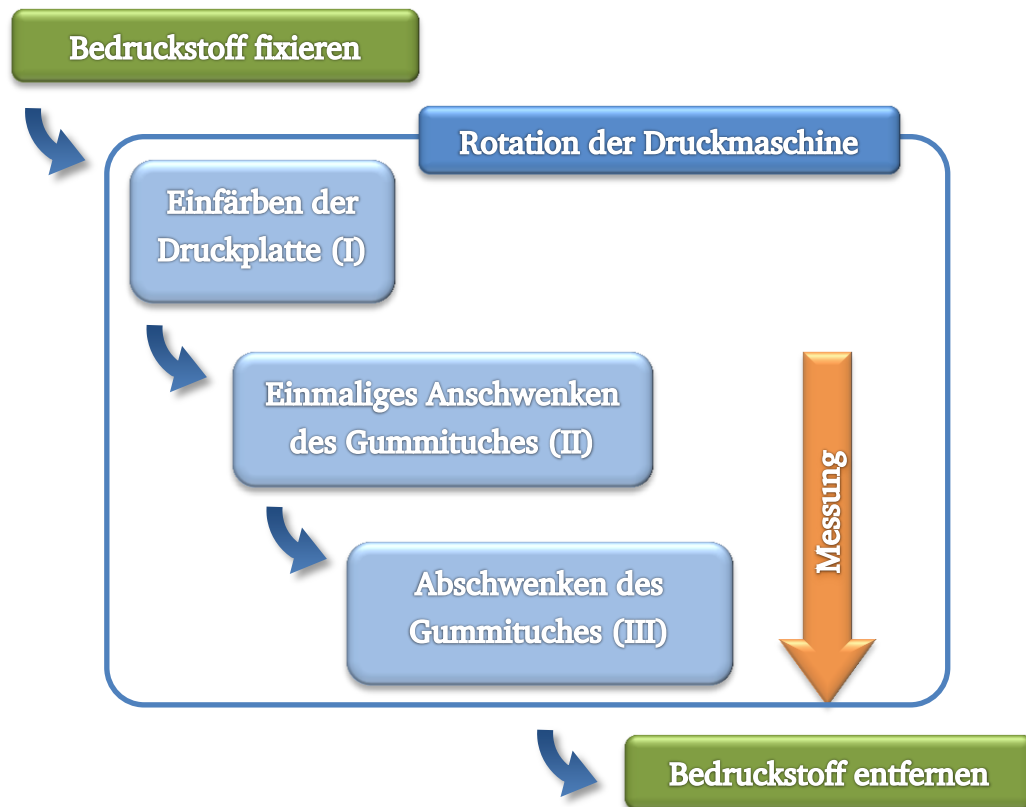


Abbildung 64: Ablaufreihenfolge eines Versuches zur Bestimmung der Messwertänderung der Farbdichte D^*_{DIS} während der Trocknung

Nachdem der Bedruckstoff auf dem Gegendruckzylinder fixiert ist, rotieren sämtliche Zylinder und Walzen der Druckmaschine und die Druckplatte wird eingefärbt (Phase I). Danach wird der Gummituchzylinder angeschwenkt und stellt den Kontakt zwischen Druckform und Bedruckstoff her. Dabei wird die Druckfarbe von der Druckplatte über das Gummituch auf den Bedruckstoff aufgetragen (Phase II). Direkt nach einer Abwicklung wird das Gummituch wieder abgeschwenkt und der Kontakt und damit der Farbtransport unterbrochen. Die Druckmaschine rotiert bei diesem Vorgang jedoch weiter (Phase III).

Während des gesamten Vorganges ist das Druckinspektionssystem in der Lage mit jeder Umdrehung ein Bild aufzunehmen und damit einen Messwert der Farbdichte aufzuzeichnen.

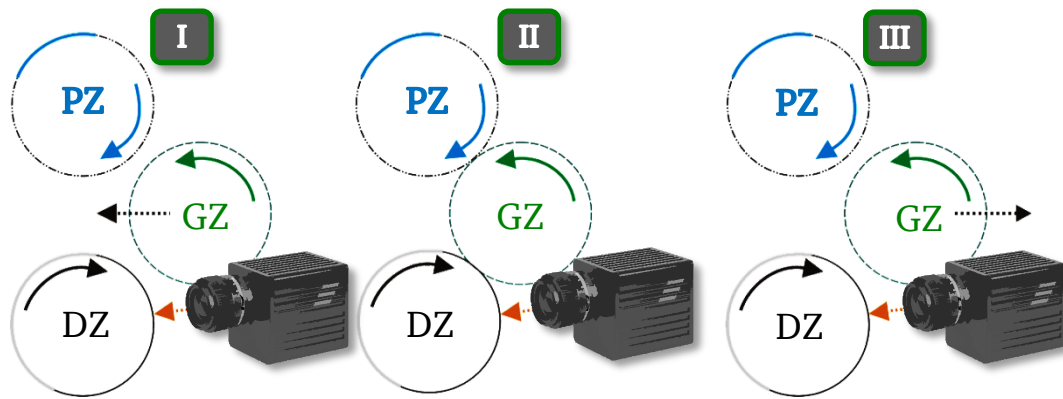


Abbildung 65: Farbauftrag zur Messung des Trocknungseinflusses auf die Farbdichte. Die Druckfarbe wird während des Kontaktschlusses (II) des Gummilackzylinders (GZ) vom Plattenzylinder (PZ) über den Gummilackzylinder auf den Bedruckstoff des Gegendruckzylinders (DZ) übertragen.

5.4 Aufbau Versuchsstand

Um die Methode aus dem vorangegangenen Kapitel umsetzen zu können, wurde ein Versuchsstand konstruiert und aufgebaut. Die Möglichkeit des einmaligen Bedruckens bei fortlaufender Rotation der Druckmaschine konnte in einer vollständig mechanisch arbeitenden Druckmaschine realisiert werden. Zudem ist bei diesem Modell die Anordnung der Druckzylinder so gestaltet, dass eine Integration der Baugruppen des Druckinspektionssystems möglich war. Der schematische Aufbau ist im Schnitt als Seitenansicht in Abbildung 66 dargestellt.

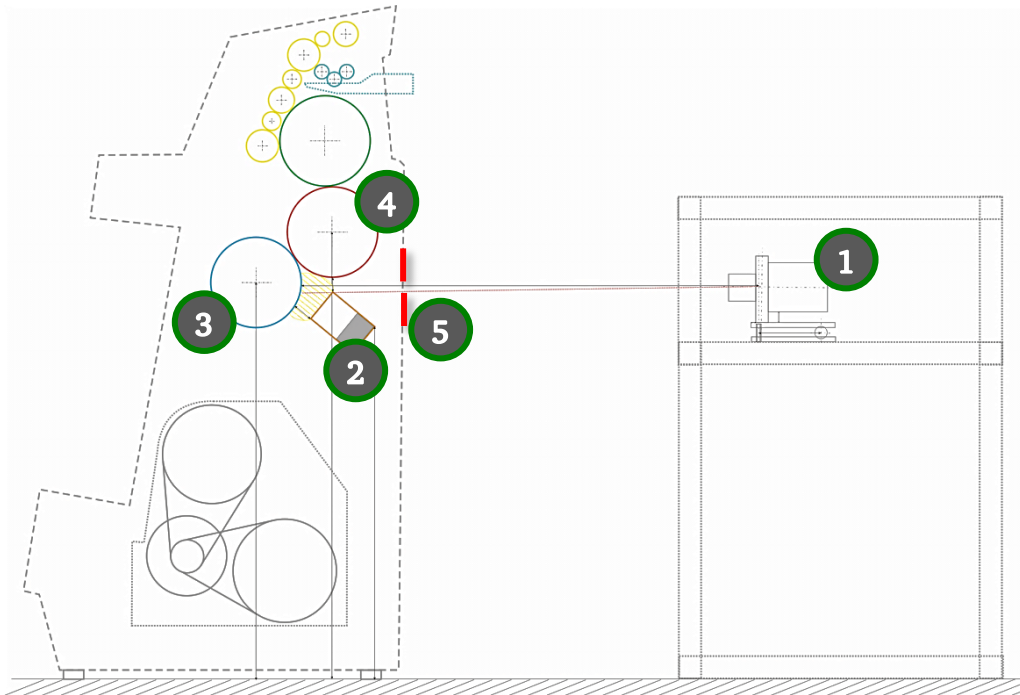


Abbildung 66: Darstellung des Versuchsstandes im Schnitt als Seitenansicht. Mit 1 ist die Kamera und mit 2 die Beleuchtung des Druckinspektionssystems bezeichnet. 3 bezeichnet den Gegendruckzylinder mit dem fixierten Bedruckstoff. 4 stellt den schwenkbaren Gummituchzylinder (roter Kreis) dar. Die bei der Kalibrierung eingeführte Blende 5 ist durch die roten Striche dargestellt.

Die Zeilenkamera 1 ist in einem in X-, Y- und Z-Richtung verstell- und fixierbaren Gestell installiert. Die Beleuchtungseinheit des Druckinspektionssystems wurde unterhalb des Gummituchzylinders schräg nach oben auf die Detektionsstelle leuchtend eingebaut. Der Drehwinkelgeber 3 konnte direkt auf den Gegendruckzylinder geflanscht werden. Das An- und Abschnen des Gummituchzylinders 4 wurde durch eine Mechanik gelöst, die sich nach einer Umdrehung selbstständig deaktiviert.

Zur Reduzierung von Streulicht wurden dieselben Maßnahmen, die am Versuchsstand für die Kalibrierung eingesetzt wurden, verwendet. Das bedeutet im Einzelnen, dass die Streulichtblende vor das Objektiv gesetzt wurde, sämtliche Bauteile, die sich in der Nähe der Detektionsstelle befinden matt schwarz lackiert und die in Kapitel 4.6 erläuterte Blende in den Strahlengang der Kamera gesetzt.

Der realisierte Aufbau ist in Abbildung 67 dargestellt.

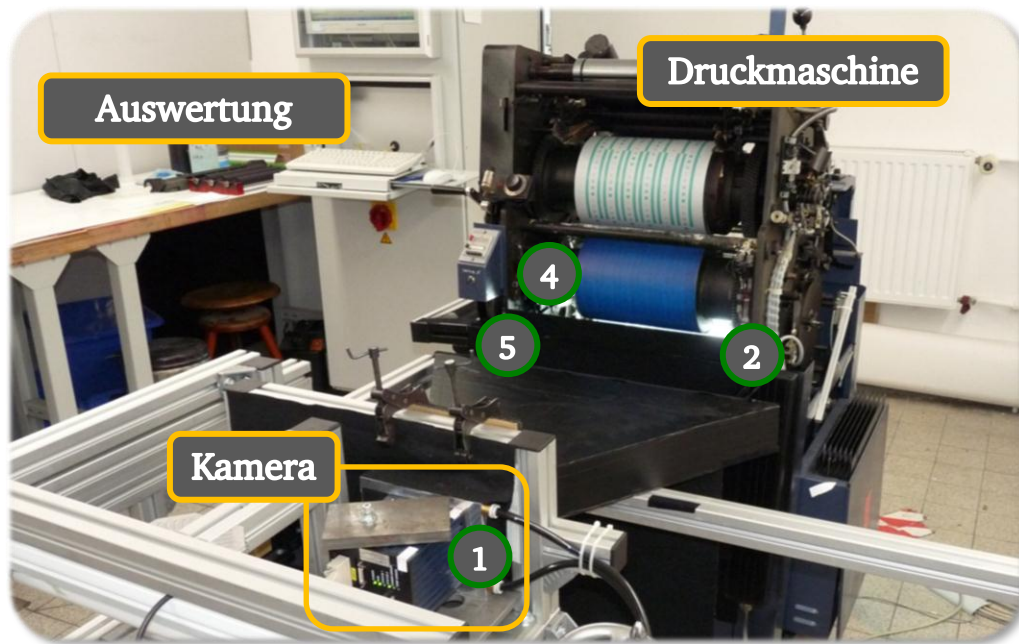


Abbildung 67: Foto vom realisierten Versuchsstand zur Untersuchung der Messwertänderung der Farbdichte. Die Zeilenkamera 1 und die Beleuchtung 2 des Druckinspektionssystems im eingebauten Zustand am Versuchsstand. Der Gummituchzylinder 4 verdeckt den Gegen-druckzylinder. Mit 5 ist die verbaute Blende bezeichnet.

Der Versuchsaufbau befindet sich in einem tageslichtfreien und temperierten Raum. Während der gesamten Versuche wurde die relative Luftfeuchtigkeit φ_{rel} und die Raumtemperatur T aufgezeichnet und dokumentiert. Die Raumtemperatur lag ständig zwischen $22^\circ\text{C} < T < 24^\circ\text{C}$ und die relative Luftfeuchtigkeit zwischen $45\% < \varphi_{rel} < 55\%$.

5.5 Grundlegende Untersuchungen

In diesem Kapitel wird zunächst ein allgemeines Ergebnis einer Messung der Farbdichte während der Trocknung gezeigt und anschließend diskutiert. Im Anschluss wird das Ergebnis einer Untersuchung gezeigt, die den Nachweis der generellen Fähigkeit einer Messung der Farbdichte im Trocknungszeitbereich $t_{D*DIS} < 10\text{s}$ bringt und bewertet. Zum Schluss wird eine einfache Analyse zur Ermittlung der Schichtdickenabhängigkeit durchgeführt.

5.5.1 Allgemeines Ergebnis der Messwertänderung der Farbdichte während der Trocknung

In Abbildung 68 ist ein typisches Beispiel für die Änderung des Messwertes der Farbdichte D^*_{DIS} über der Trocknungszeit $t_{D^*_{DIS}}$ dargestellt. Dabei wurden die Messwerte mit Hilfe des Versuchsaufbaus aus Kapitel 5.4 generiert.

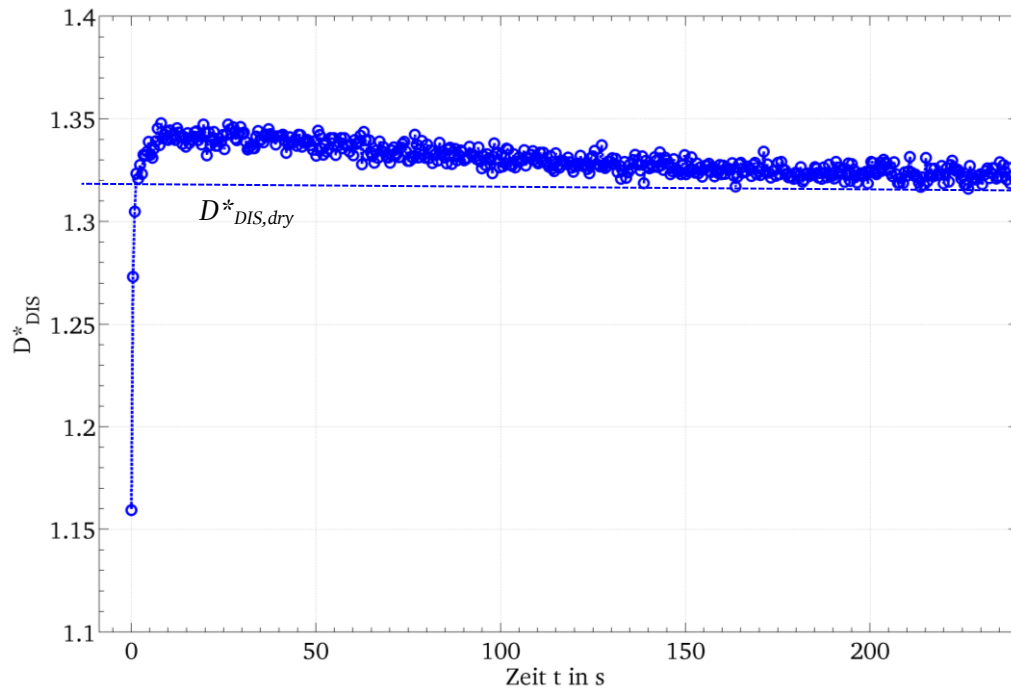


Abbildung 68: Typisches Beispiel für die Änderung des Messwertes der Farbdichte D^*_{DIS} während der Trocknungszeit $t_{D^*_{DIS}}$. Nach Farbauftrag ist zunächst ein rascher Anstieg und anschließend ein langsames Abfallen des Messwertes detektierbar.

Gedruckt wurde im gezeigten Beispiel ein Cyan auf einen glatten, glänzenden Bedruckstoff. In der Auftragung ist zu erkennen, dass der Messwert der Farbdichte D^*_{DIS} zunächst rasch ansteigt und nach einigen Sekunden kontinuierlich über einen längeren Zeitraum abklingt. Nach einer längeren Zeit konvergiert die Änderung des Messwertes der Farbdichte D^*_{DIS} gegen eine Asymptote, die der Farbdichte $D^*_{DIS,dry}$ der getrockneten Druckfarbe entspricht.

Diese Entwicklung des Messwertes D^*_{DIS} der Farbdichte über der Trocknungszeit $t_{D^*_{DIS}}$ stimmt mit aktuell erforschten Ergebnissen der FOGRA Forschungsgesellschaft Druck e.V. überein. Im Jahresbericht 2009 wird beschrieben, dass die FOGRA

Untersuchungen mit konventionellen und normgerechten Densitometern durchführt, welche die Farbdichte D während der Trocknungszeit t_D messen. Bei diesem Forschungsvorhaben wird die Farbdichte ebenfalls kontinuierlich ab 0,1s nach Auftrag der Druckfarbe gemessen. Auch bei der Verwendung normkonformer Messgeräte und dem Einsatz von Polarisationseinrichtungen ist ein Anstieg und ein anschließendes Abfallen des Messwertes der Farbdichte bis zu einem fixen Wert der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe detektierbar [48].

5.5.2 Interpretation des Messverlaufs

Der in Abbildung 64 dargestellte Verlauf des Messwertes der Farbdichte soll hier näher diskutiert und gedeutet werden. Dazu wird unterschieden zwischen Effekten, die einen Anstieg des Messwertes begründen und Effekten, aus denen der anschließende Abfall des Messwertes resultiert.

Anstieg des Messwertes

Das erläuterte allgemeine Verhalten des Messwertanstieges während der ersten Sekunden der Trocknungszeit ist weder mit einer energetischen Betrachtungsweise konform, noch mit bisher bekannten Literaturkenntnissen erklärbar. Um einen Anstieg der Farbdichte realisieren zu können, müsste während der Trocknungsphase die aus der Farbe reflektierte Strahlung kleiner werden. Dies kann beispielsweise durch die Zunahme der Schichtdicke oder der Absorptionsfähigkeit der Druckfarbe passieren. Beides ist energetisch sowie praktisch unmöglich. Vorstellbar wäre eine Abnahme dieser Einflüsse, etwa durch Verdunstungseffekte. Dies hätte jedoch eine Abnahme der Farbdichte zur Folge und kann den detektierten Anstieg der Farbdichte nicht rechtfertigen. Nach Literaturkenntnissen, ist ebenfalls nur bekannt, dass die Farbdichte über der Trocknungszeit abfällt [6, 9, 20, 21, 45, 52, 57, 63, 85, 90, 127].

Da die Farbdichte demnach nicht größer werden kann, muss korrekterweise von einem Anstieg des Messwertes der Farbdichte gesprochen werden. Damit der Messwert der

Farbdichte größer werden kann, muss die in Richtung des Detektors reflektierte Strahlung abnehmen. Dabei kann die Strahlung sowohl aus der Druckfarbe als auch von der Oberfläche herrühren. Ändert sich während der Trocknung der Druckfarbe ihre Oberfläche, ändert sich damit ebenfalls der Anteil der in Richtung des Detektors reflektierten Strahlung.

In Abbildung 69 ist ein seitlicher Blick in den Spalt zwischen zwei Farbwalzen gezeigt. Dabei ist deutlich eine Filamentbildung (roter Pfeil) der Druckfarbe durch den Farbspaltungsprozess zu sehen.

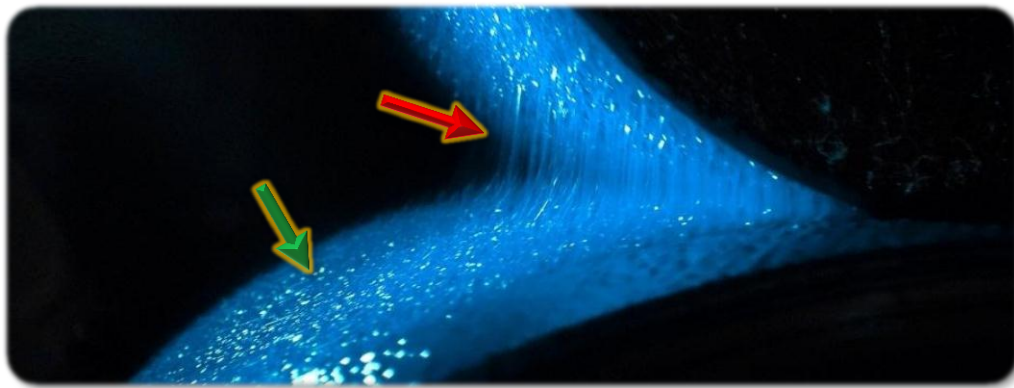


Abbildung 69: Seitlicher Blick in den Nip. Es ist sowohl die Filamentbildung (roter Pfeil), als auch die rückbleibende strukturierte Oberfläche (grüner Pfeil) durch Reißen der Filamente zu sehen. Das Bild wurde mit einer für den Offsetdruck irrelevant hohen Schichtdicke aufgenommen.

Der Effekt der Filamentbildung tritt in Abhängigkeit der rheologischen Eigenschaften der Druckfarbe und der Kontaktmaterialien auf und wurde in mehreren Arbeiten nachgewiesen, untersucht und beschrieben [8, 17, 62, 104]. Bedingt durch das Abreißen der Filamente der Druckfarbe entsteht zunächst eine raue Oberfläche des Druckfarbenfilms auf dem Bedruckstoff (grüner Pfeil in Abbildung 69). Getrieben von der Eigenschaft der Oberflächenminimierung verfließt die Druckfarbe und es bildet sich nach diesem Vorgang eine glatte Oberfläche aus. Es gibt nach MEICHSNER und GLATTER Modelle, die dieses Verfließen für einfache und idealisierte Filme bestätigen und theoretisch sowie praktisch beschreiben [14, 50, 86, 92].

Neben diesen rheologischen Betrachtungen des Prozesses ist nachzuweisen, dass die beschriebenen Oberflächenänderungen einen Einfluss auf eine optische Messung haben. Dazu können Ergebnisse aus Untersuchungen über die Änderung des Glanzes einer Druckfarbe in Abhängigkeit der Trocknungszeit durchgeführt werden. Dabei konnte eindeutig eine optische Wirkung dieser Oberflächenänderung nachgewiesen werden [50, 70, 99].

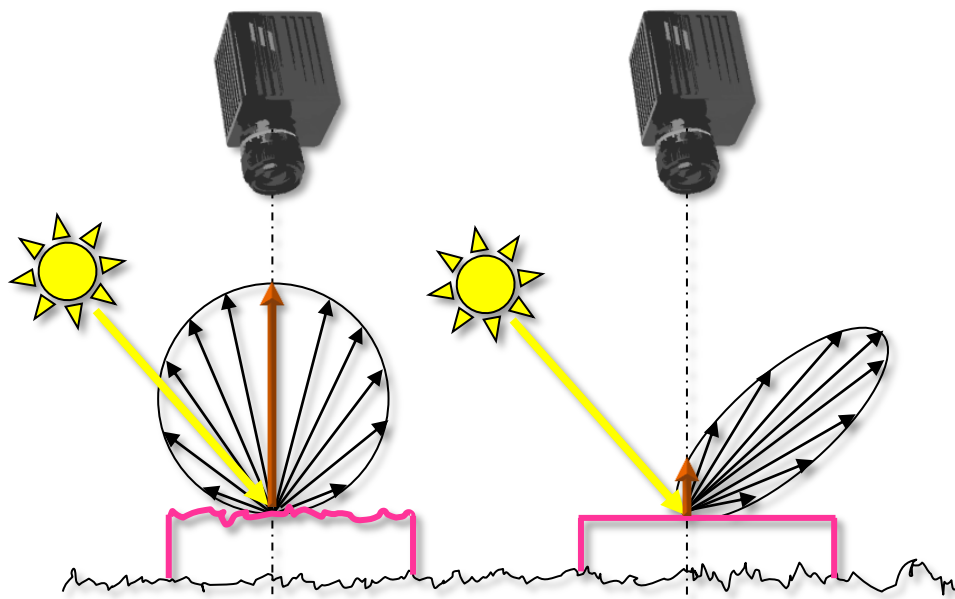


Abbildung 70: Vergleich der Oberflächenreflexion in Abhängigkeit der Druckfarbenoberfläche. Eine raue Oberfläche reflektiert diffuser als eine glatte. Aus diesem Grund wird bei einer rauhen Oberfläche ein größerer Anteil an Oberflächenreflexion in Richtung der Kamera reflektiert als bei einer glatten Oberfläche.

In Abbildung 70 ist die Oberflächenreflexion bei rauer und glatter Druckfarbenoberfläche skizziert. Zudem ist die vereinfachte Beleuchtungs- und Detektionsgeometrie des Druckinspektionssystems dargestellt. Es wird deutlich, dass der in Richtung der Kameradetektion strahlende Anteil der Oberflächenreflexion abhängig von der Rauheit der Druckfarbenoberfläche ist. Durch den Übergang von einer rauhen zu einer glatten Oberfläche nimmt der Anteil der in Richtung der Kamera reflektierten Strahlung ab. Durch die reziproke logarithmische Berechnung der Farbdichte aus dem Reflexionsgrad steigt damit der Messwert der Farbdichte an. Bei der Messwertaufnahme mittels des Druckinspektionssystems gibt es neben der

Geometrie der Detektion keine oberflächenreflexionsmindernden Baugruppen, wie zum Beispiel eine Polarisationsrichtung. Aus diesem Grund wird bei dieser Messung im Vergleich zu einer normgerecht durchgeführten Messung immer ein größerer Anteil an Oberflächenreflexion mitgemessen. Damit muss der Effekt bei einer Messung der Farbdichte mittels eines Druckinspektionssystems einen signifikanten Einfluss haben.

Abfall des Messwertes

Nach anfänglichem Anstieg des Messwertes der Farbdichte fällt der Messwert mit zunehmender Trocknungsdauer ab. Auch dieses Verhalten des Messwertes kann zum Teil mit einer Änderung der Oberflächenstruktur beschrieben werden. Bedingt durch den Trocknungsprozess des Wegschlagens, aber auch der oxidativen Trocknung geht die Oberflächenstruktur von dem glatten Zustand nach dem Verfließen in einen raueren Zustand über. Dabei wird von der trocknenden Druckfarbe zum einen die Oberflächenstruktur des Bedruckstoffes abgeformt. Zum anderen bildet sich durch die oxidative Trocknung eine Haut auf der Druckfarbe aus. Diese nimmt infolge der Bewegung der Druckfarbe durch den Wegschlagvorgang eine raue Struktur an [52, 88]. Durch die rauere Oberfläche wird erneut ein größerer Anteil der Oberflächenreflexion in Richtung der Kamera reflektiert.

Dieses Verhalten ist in Abbildung 71 dargestellt. Im linken Teil ist die Oberflächenreflexion der Druckfarbe nach dem Verfließen dargestellt. Durch die beschriebenen Trocknungsvorgänge entsteht die im rechten Teil der Grafik dargestellte raue Oberfläche. Eine raue Oberfläche reflektiert einen größeren Teil der Oberflächenreflexion in Richtung der Kamera.

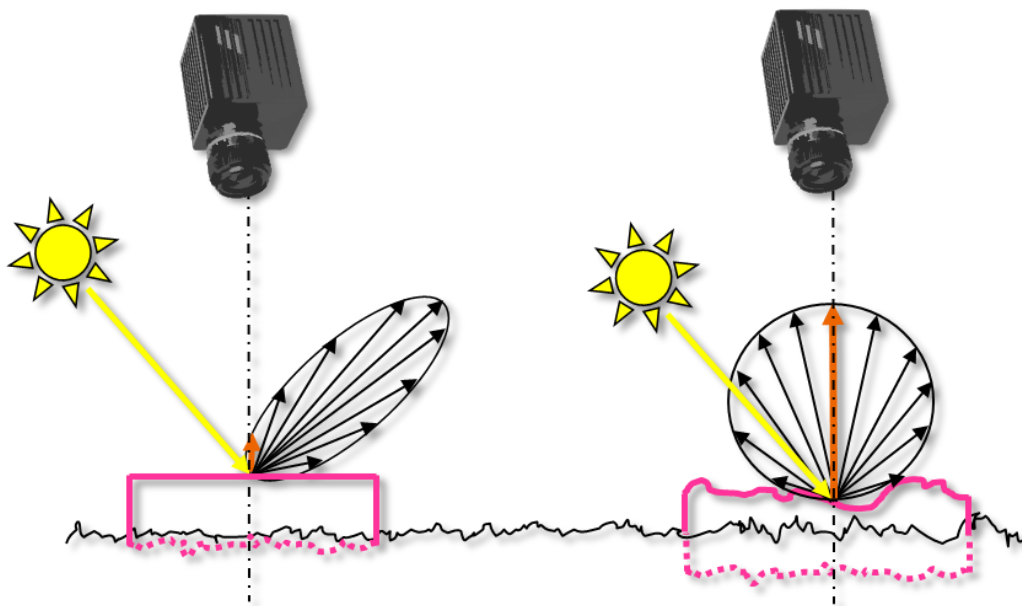


Abbildung 71: Vergleich der Oberfläche der Druckfarbe und der Kontaktzone zum Bedruckstoff. Die raue Oberfläche der getrockneten Druckfarbe reflektiert diffuser als eine glatte. Aus diesem Grund wird bei einer rauen Oberfläche ein größerer Anteil an Oberflächenreflexion in Richtung der Kamera reflektiert als bei einer glatten Oberfläche. Zudem sind neben den transparenten flüssigen Anteilen der Druckfarbe Pigmente in den Bedruckstoff transportiert worden.

Neben der Änderung der Eigenschaften der Oberflächengeometrie kann es abhängig von den Bedruckstoffeigenschaften auch zu einer Änderung der Pigmentkonzentration im Schichtvolumen des Druckfarbenfilms kommen. Dies resultiert aus dem Wegschlagen der flüssigen Bestandteile der Druckfarbe. Die Pigmente werden nur in geringem Maße mit in den Bedruckstoff transportiert. Somit ist die Pigmentkonzentration in der trockenen Druckfarbenschicht höher. Zudem kann sich während der Trocknungszeit der Einfluss der Farbe des Bedruckstoffs auf das Reflexionsspektrum der lasierenden Druckfarbe ändern. Dies passiert vor allem, wenn bei ungestrichenen Bedruckstoffen doch Pigmente mit in die Bedruckstoffmatrix eingezogen werden [52].

Damit gibt es mehrere sich überlagernde Effekte, die ein Abfallen des Messwertes der Farbdichte, aber auch der Farbdichte selber begründen.

5.5.3 Nachweis der Deutung der Messwertzunahme

Wie zuvor in Abschnitt 5.5.2 erläutert, muss eine Änderung des Anteils der Oberflächenreflexion während der Trocknung einen Einfluss auf die Messwertänderung der Farbdichte haben. Ist die Annahme richtig, dass der Anstieg und teilweise ebenfalls der Abfall der Farbdichte auf Einflüsse durch Oberflächenreflexionen bedingt ist, müsste eine Messung einer Druckfarbe, die keine farbgebenden Elemente enthält ein vergleichbares Verhalten zeigen. Unter einer Druckfarbe ohne farbgebende Elemente wird hier eine durchsichtige, pigmentfreie Druckfarbe verstanden. Wichtig ist, dass diese Druckfarbe in allen weiteren Punkten, wie beispielsweise den rheologischen Eigenschaften, einer konventionellen Druckfarbe entspricht. Eine solche Druckfarbe wird als Transparentweiß bezeichnet und wird eigentlich zur Verdünnung der Pigmentkonzentration von Druckfarben in Druckereien eingesetzt. Mit dem dargestellten Transparentweiß sind in dem in Kapitel 5.4 beschriebenen Versuchsstand Messungen der Farbdichte während der Trocknungszeit angefertigt worden.

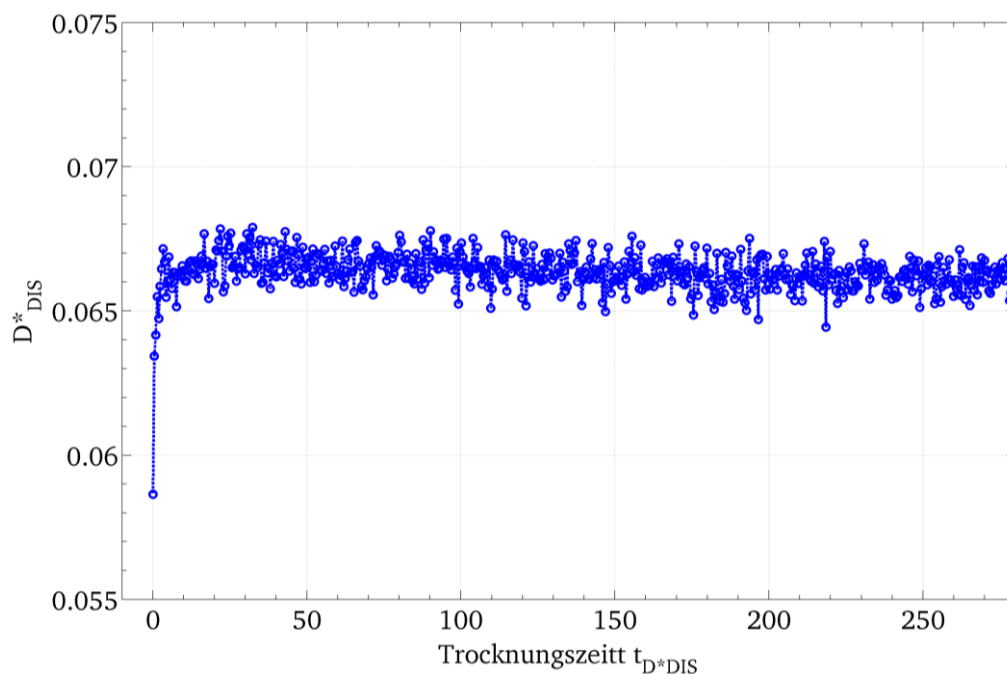


Abbildung 72: Farbdichte D^*_{DIS} über der Trocknungszeit t_{D^*DIS} für ein farbloses Transparentweiß. Transparentweiß ist eine pigmentfreie, durchsichtige Offsetdruckfarbe.

In Abbildung 72 ist als Ergebnis die Farbdichte D^*_{DIS} von Transparentweiß über der Trocknungszeit $t_{D^*_{DIS}}$ aufgetragen. Es ist zu sehen, dass generell eine sehr niedrige Farbdichte D^*_{DIS} gemessen wird. Dies zeigt, dass das Transparentweiß zwar nicht ideal transparent ist, jedoch einem transparenten Ideal nahe kommt. Wie bei Messungen der Farbdichte D^*_{DIS} von Druckfarben steigt der Messwert der Farbdichte D^*_{DIS} über der Trocknungszeit $t_{D^*_{DIS}}$ zunächst an, bevor er anschließend langsamer abfällt. Da bei der verwendeten Druckfarbe keiner der auszuschließenden Effekte wie eine Änderung der Absorptionskoeffizienten etc. auftreten kann, muss die Änderung des Messwertes ausschließlich aus einer Änderung der Oberfläche der Druckfarbe und damit aus dem in Richtung der Kamera reflektierten Anteil der Oberflächenreflexion resultieren.

5.5.4 Fähigkeit der Messungen im Kurzzeitbereich

Bei einer Inline-Messung der Farbdichte D^*_{DIS} werden Daten nach sehr kurzen Trocknungszeiten aufgenommen. Das Verhalten dieser Inline-Messungen in Anhängigkeit der Trocknungszeit ist bisher unklar. Deshalb muss eine Aussage über die Reproduzierbarkeit dieser Inline-Messungen getroffen werden. Die Reproduzierbarkeit eines Messwertes wird durch die zweifache Standardabweichung von Wiederholungsmessungen, die unter denselben Umgebungsbedingungen aufgenommen wurden, berechnet (vgl. Abschnitt 4.5). Damit werden für diese Analyse mehrere Messungen derselben Farbdichte der getrockneten Druckfarbe erstellt.

Es gibt jedoch keine Möglichkeit die in dem Versuchstand integrierte Druckmaschine so einzustellen, dass vorhersagbar und definiert dieselbe Farbdichte wiederholt auf den Bedruckstoff übertragen wird. Deshalb sind für zwei Bedruckstoffklassen (glatt, gestrichen und matt, ungestrichen) 60 Versuche durchgeführt worden, in denen jeweils fünf Minuten lang die Farbdichte während der Trocknungszeit gemessen wurde. In der anschließenden Auswertung wurden die Messungen nach

der nach fünfminütiger Trocknungszeit erreichten Farbdichte sortiert und ähnliche Ergebnisse gruppiert. Aufgrund der großen Anzahl an durchgeführten Versuchen, ergeben sich somit mehrere Messungen mit semiidentischer Farbdichte nach fünfminütiger Trocknungszeit.

Damit sind Wiederholungsmessungen erstellt worden, aus denen eine Berechnung der zweifachen Standardabweichung der Messwerte für jeden Zeitpunkt der Trocknung berechnet werden kann. Somit ist eine Aussage über die Reproduzierbarkeit des Messwertes zu jedem Zeitpunkt der Trocknung getroffen worden.

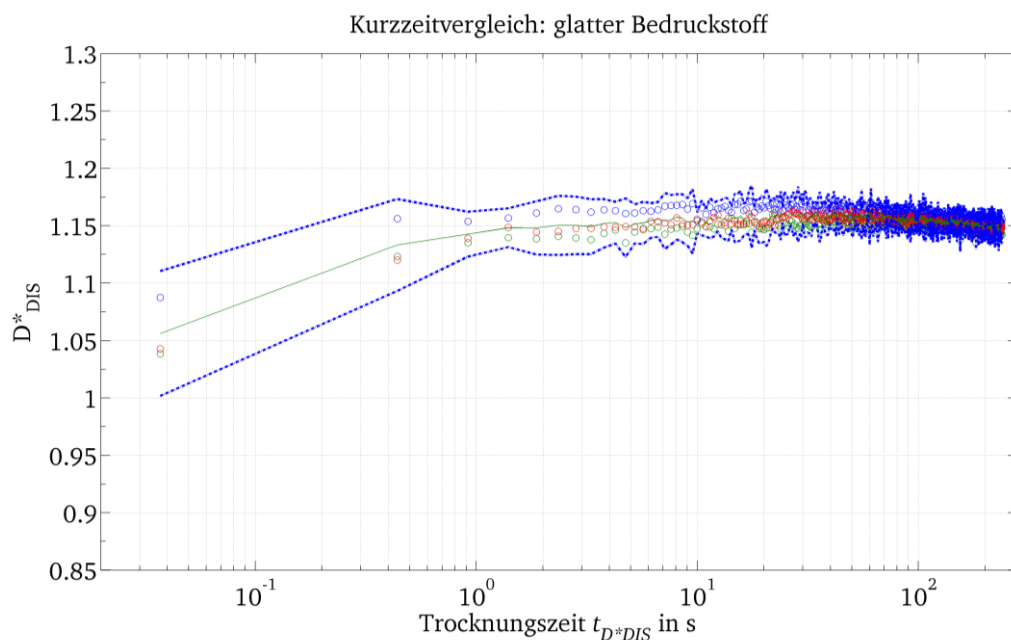


Abbildung 73: Kurzzeitverhalten der gerätespezifischen Farbdichte D^*_{DIS} für einen glatten Bedruckstoff. Aufgetragen ist die Farbdichte über der Trocknungszeit für Messungen, die die gleiche Farbdichte der getrockneten Druckfarbe haben. Die blauen Linien stellen die zweifache Standardabweichung 2σ in Abhängigkeit der Trocknungszeit als Maß der Reproduzierbarkeit in Abhängigkeit der Trocknungszeit dar.

In Abbildung 73 ist die Auswertung einer Untersuchung des Kurzzeitverhaltens des Messwertes zu sehen. Für das dargestellte Beispiel wurde ein Gelb (Y) auf einem glänzend gestrichenen Bedruckstoff gedruckt. Die Untersuchung wurde ebenfalls für die weiteren Druckfarben Magenta (M) und Cyan (C) durchgeführt. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist jedoch

vergleichbar mit dem dargestellten Ergebnis für Gelb und wird als druckfarbenunabhängig bewertet. Die Messwerte werden durch die farbigen Rauten repräsentiert, wobei jede Farbe zu einer Messung gehört. Die blauen Punkt-Strich-Linien beschreiben die zweifache Standardabweichung $2\sigma(D^*_{DIS})$ der Messwerte zum jeweiligen Messzeitpunkt. Es ist zu erkennen, dass die Standardabweichung während der Trocknungszeit abnimmt. Für Trocknungszeiten größer 200s ist die Standardabweichung der sechs Messungen in der gleichen Größenordnung, die durch das Messsystem selbst generiert wird. In einem Trocknungszeitraum zwischen 10s und 200s nimmt das Maß der Streuung kontinuierlich zu. Für Trocknungszeiten kleiner 10s wird die Standardabweichung am größten. Der Betrag der zweifachen Standardabweichung $2\sigma(D^*_{DIS})$ zu diesem Zeitpunkt liegt bei 0,055. Der Betrag der zweifachen Standardabweichung $2\sigma(D^*)$ einer Messung getrockneter Druckfarbe ist 0,008. Damit ist die Reproduzierbarkeit der Messung druckfrischer Farbe auf glänzend gestrichenem Bedruckstoff um fast eine Größenordnung schlechter, als die von getrockneten Druckfarben.

Dieselben Untersuchungen, die vorangegangen für einen glatten Bedruckstoff durchgeführt wurden, sind ebenfalls für einen ungestrichenen, matten Bedruckstoff durchgeführt worden. Das Ergebnis ist in Abbildung 74 dargestellt. Auch hier ist die zweifache Standardabweichung der Messwerte für druckfrische Farben größer als bei trockeneren und trockenen Farben. Allerdings nimmt die Streuung von Messungen mit kleiner Trocknungszeit weniger stark zu als bei glänzend gestrichenen Bedruckstoffen. Die zweifache Standardabweichung $2\sigma(D^*_{DIS})$ von Messungen an druckfrischen Farben liegt bei 0,006 und ist damit für matte Bedruckstoffe um den Faktor 0,5 kleiner als bei glänzenden Bedruckstoffen. Die zweifache Standardabweichung $2\sigma(D^*_{DIS})$ für getrocknete Druckfarbe ist für matte Bedruckstoffe gleich der von glänzenden Bedruckstoffen.

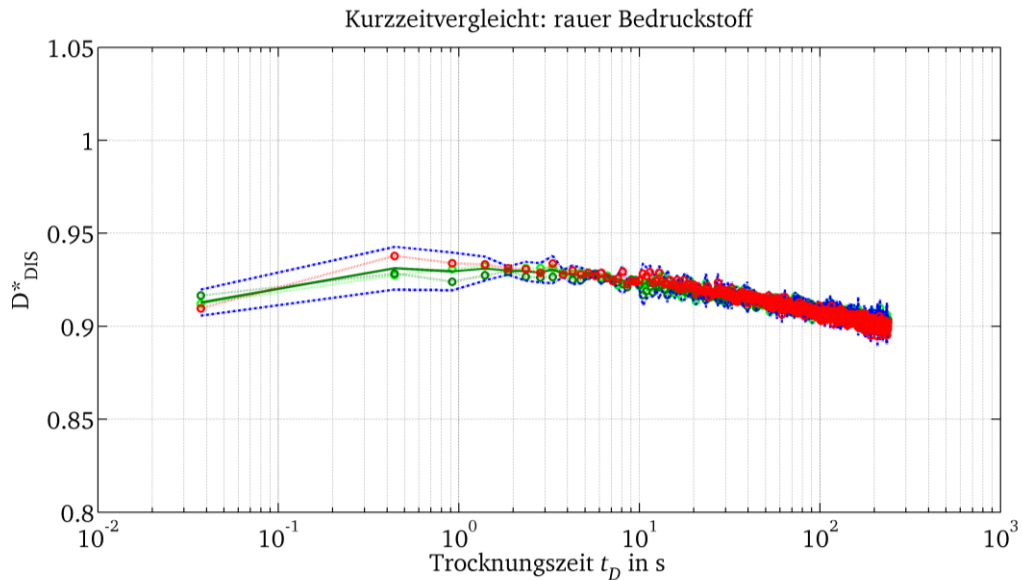


Abbildung 74: Kurzzeitverhalten der Messwerte für einen rauen Bedruckstoff. Aufgetragen ist die Farbdichte D^*_{DIS} über der Trocknungszeit für mehrere Versuche mit derselben Farbdichte der fünf Minuten getrockneten Druckfarbe. Die blauen gestrichelten Linien beschreiben die zweifache Standardabweichung der Messwerte zur jeweiligen Trocknungszeit als Maß der Reproduzierbarkeit in Abhängigkeit der Trocknungszeit.

Damit wird deutlich, dass sehr kurze Trocknungszeiten einen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit des Messwertes haben. In Abbildung 75 ist zusammenfassend die zweifache Standardabweichung für diskrete Trocknungszeiten in Abhängigkeit des Bedruckstoffes dargestellt.

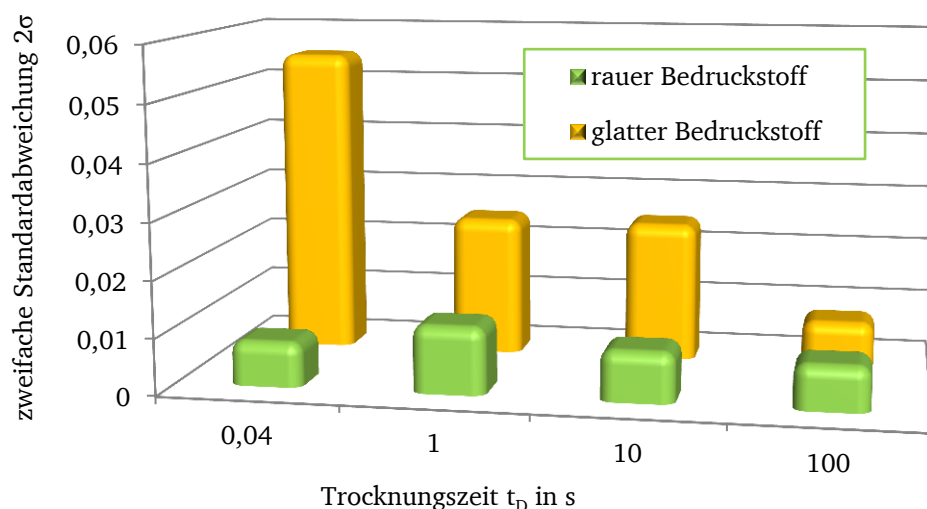


Abbildung 75: Zweifache Standardabweichung zu verschiedenen Trocknungszeiten in Abhängigkeit des Bedruckstoffes

Trotz des Einflusses der Trocknung der Druckfarbe auf die Reproduzierbarkeit des Messwertes, liegt die Größe der zweifachen Standardabweichungen in einem Bereich, der eine kontrollierte Beschreibung der Messwertänderung während der Trocknungszeit ermöglichen sollte. Wichtig ist, dass die variierende Streuung in Abhängigkeit der Trocknungszeit in der Beschreibung berücksichtigt werden muss.

5.5.5 Einfluss der Schichtdicke auf Kurzzeitmessung

Die Messwertänderung D^*_{DIS} der Farbdichte während der Trocknung muss abhängig von der verdruckten Schichtdicke sein. Um dies zu zeigen wurden die Messwerte der Farbdichte während der Trocknung von verschiedenen Schichtdicken auf die Farbdichte nach einer Trocknungszeit von 300s normiert. Anschließend wurden die normierten Farbdichten $D^*_{DIS} / D^*_{DIS,300s}$ über der Trocknungszeit $t_{D^*_{DIS}}$ aufgetragen (Abbildung 76).

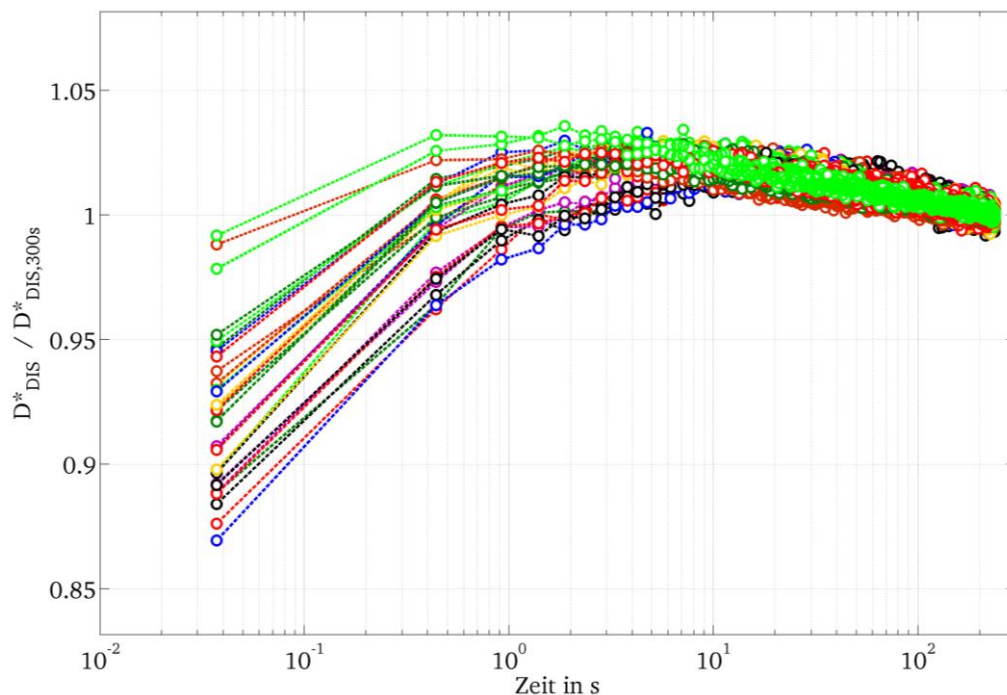


Abbildung 76: Aufgetragen ist die normierte Farbdichte D^*_{DIS} über der Trocknungszeit $t_{D^*_{DIS}}$ für einen glatten, glänzenden Bedruckstoff. Normiert wurde auf die Farbdichte D^*_{DIS} nach 300s Trocknungszeit.

Wäre die Messwertänderung der Farbdichte D^*_{DIS} unabhängig von der aufgetragenen Schichtdicke, müsste die Auftragung der normierten Farbdichten der verschiedenen Schichtdicken über der Trocknungszeit t_{D^*} deckungsgleich verlaufen. Dies ist nicht der Fall. Stattdessen wird deutlich, dass die Messwertänderung D^*_{DIS} vor allem für Trocknungszeiten $t_{D^*DIS} < 20\text{s}$ abhängig von der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe bzw. von der Schichtdicke der Druckfarbe ist.

Könnte die Abhängigkeit von der Schichtdicke der gedruckten Druckfarbe durch einen linearen Zusammenhang beschrieben werden, müssten in Abbildung 76, in der die normierten Farbdichten der verschiedenen Schichtdicken über der Trocknungszeit t_{D^*DIS} aufgetragen sind, die Auftragungen in Richtung der Ordinate parallel verschoben sein. Eine solche Parallelverschiebung ist in Abbildung 76 nicht erkennbar. Somit wird deutlich, dass die Abhängigkeit zwischen der gedruckten Schichtdicke der Druckfarbe und der Messwertänderung der Farbdichte D^*_{DIS} nicht durch einen linearen Zusammenhang beschrieben werden kann. Dies gilt zunehmend für Trocknungszeiten

$t_{D^*DIS} < 10\text{s}$.

5.6 Modellbildung zur quantitativen Auswertung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde das allgemeine Verhalten des Messwertes der Farbdichte D^*_{DIS} während der Trocknungszeit t_{D^*DIS} gezeigt. In diesem Abschnitt soll ein Modell zur quantitativen Beschreibung des Verhaltens eingeführt werden. Das Ziel dabei ist es eine Funktion zu finden, mit der die Farbdichte $D^*_{DIS}(t_{D^*DIS,i})$ in Abhängigkeit der Trocknungszeit bestimmt werden kann.

5.6.1 Bewertung existierender Teilmodelle

In Abschnitt 5.5 wurde erläutert, dass mehrere Effekte den Messwert der Farbdichte während der Trocknungszeit beeinflussen. Einen erheblichen Anteil hieran haben Effekte, die durch eine Änderung der Oberfläche während der Trocknung

hervorgerufen werden. Um die Oberflächenänderung vom rauen Zustand nach Farbauftrag zu einer glatten Oberflächenstruktur nach einer Verlaufszeit beschreiben zu können, existieren wie zuvor genannt Modellansätze nach MEICHSNER und GLATTER [50, 86, 92]. Allerdings hängen diese Modelle von vielen Parametern ab, die in der Druckmaschine weder bestimmt noch konstant gehalten werden können. Des Weiteren gelten immer Annahmen und Randbedingungen, die ebenfalls nicht für Druckfarben, die in einer Druckmaschine verdruckt werden, gelten. Für die Oberflächenausbildung von dem glatten Zustand nach dem Verfließen zu einer rauerer Struktur ist keine Beschreibung oder Modellbildung bekannt.

Die Änderung einer Pigmentkonzentration bzw. das Penetrieren von Pigmenten in den Bedruckstoff könnte durch ein etabliertes semiempirisches Modell wie der in Gleichung 5.2 notierten KUBELKA-MUNK Theorie, beschrieben werden [40, 81, 83, 86, 124, 128].

$$\frac{K_S}{S} = \frac{(1 - \beta_\infty)^2}{2 \cdot \beta_\infty} \quad 5.2$$

Die KUBELKA-MUNK Theorie beschreibt in Abhängigkeit des Verhältnisses des sogenannten Absorptionskoeffizienten K_S und des Streukoeffizienten S die Reflexion β_∞ einer unendlich dicken Farbschichtdicke. Mit Hilfe dieser Theorie und einigen Messungen des Reflexionsgrades für verschiedene Schichtdicken, können Werte für K und S bestimmt werden. Rückwirkend kann bei Kenntnis von K und S die Farbwirkung bei einer bestimmten Schichtdicke berechnet werden. Somit könnten K und S für eine Änderung der Schichtdicke infolge der Trocknungsvorgänge bestimmt werden. Damit gäbe es zwar eine Methode die optische Wirkung durch die Schichtdickenänderung zu beschreiben, aber weiter kein Modell, welches die Änderung der Farbdichte beschreiben könnte.

Insgesamt können damit bekannte Modelle nicht einfach für das erklärte Ziel einer Beschreibung der Farbdichte während der Trocknungszeit verwendet werden. Aus diesem Grund soll

für die Beschreibung ein eigenes empirisch begründbares Modell gefunden werden. Alle genannten Modelle haben gemeinsam, dass sie allgemein Relaxationsvorgänge beschreiben. Solche abklingenden Vorgänge können allgemein mit Exponentialfunktionen wie in Gleichung 5.3 beschrieben werden.

$$f(x) = e^x \quad 5.3$$

Die Grundform einer Exponentialfunktion ist ebenso zu den Modellen des Verfließens, wie auch den Modellen der KUBELKA-MUNK Theorie konform. Damit wird allgemein eine Exponentialfunktion als Ansatz zur Beschreibung der verschiedenen Effekte angenommen.

5.6.2 Entwicklung des empirischen Modells

Aus den Diskussionen und Darstellungen des allgemeinen Verlaufes des Messwertes der Farbdichte während der Trocknung werden zunächst drei Haupteffekte vermutet:

- Der Oberflächenübergang von rau nach glatt durch Verfließen der Druckfarbe
- Der Oberflächenübergang von glatt nach rau durch Wegschlagen durch eine Dynamik in der Druckfarbe infolge des Wegschlagens
- Eine reale Änderung der optischen Eigenschaften der Druckfarbe

Für jeden der Effekte wird eine Exponentialfunktion angenommen. Zudem überlagern sich die drei Effekte zeitlich. Damit wird eine Summe von drei Exponentialfunktionen als Ansatzfunktion 5.4 bestimmt.

$$f(x) = e^x + e^x + e^x \quad 5.4$$

Jeder der Effekte hat einen relativen Anteil auf die Gesamtänderung des Messwertes. Um diesen zu berücksichtigen, wird für jede Exponentialfunktion ein Faktor C_i in die Ansatzfunktion 5.5 eingeführt.

$$f(x) = C_1 \cdot e^x + C_2 \cdot e^x + C_3 \cdot e^x \quad 5.5$$

Ebenso ist aus den grundlegenden Untersuchungen ersichtlich, dass jeder der drei Effekte zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Trocknungszeit den Hauptanteil an der Änderung des Messwertes hat. Das bedeutet, dass jedem der Effekte eine Zeitkonstante θ_i zugeordnet werden kann. Da der Verlauf der Farbdichte während der Trocknung streng monoton fallend oder steigend, aber immer positiv ist, wird ein negativer Exponent angenommen. Um die Zeitkonstante in Sekunden ablesen zu können, wird sie zudem reziprok in die Ansatzfunktion 5.6 eingeführt.

$$f(x) = C_1 \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_1}x\right)} + C_2 \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_2}x\right)} + C_3 \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_3}x\right)} \quad 5.6$$

Da die Farbdichte während der Trocknungszeit gegen den Grenzwert der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe konvergiert, muss weiter ein konstanter Term A in die Ansatzfunktion 5.7 integriert werden.

$$f(x) = A + C_1 \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_1}x\right)} + C_2 \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_2}x\right)} + C_3 \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_3}x\right)} \quad 5.7$$

Die Ansatzfunktion 5.7 wird als Grundlage für eine empirische Beschreibung der Farbdichte während der Trocknung verwendet. Wird sie so umgeschrieben, dass die Koeffizienten A , C_i sowie x den realen Größen entsprechen, folgt Gleichung 5.8.

$$D_{DIS}^*(t_{D_{DIS}^*}) = D_{DIS,dry}^* + \Delta D_{DIS,1}^* \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_1}t_{D_{DIS}^*}\right)} + \Delta D_{DIS,2}^* \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_2}t_{D_{DIS}^*}\right)} + \Delta D_{DIS,3}^* \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_3}t_{D_{DIS}^*}\right)} \quad 5.8$$

Dabei entspricht A der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe $D_{DIS,dry}^*$. Jeder der drei Effekte, die in dieser Modellierung berücksichtigt werden, hat einen Anteil auf die Gesamtänderung der Farbdichte während der Trocknungszeit. Der Betrag der Änderung jedes Effektes i wird mit $\Delta D_{DIS,i}^*$ bezeichnet und

entspricht C_i in Ansatzfunktion 5.7. Weiter entspricht x der Trocknungszeit t_{D^*DIS} .

5.6.3 Bestimmung von geeigneten Startwerten

Nachdem die Ansatzfunktion 5.8 bestimmt worden ist müssen durch Versuche Daten generiert werden, mit deren Hilfe empirische Werte für die sieben Koeffizienten approximiert werden können. Da die Ansatzfunktion vollständig empirisch aufgestellt worden ist und sich nicht auf bekannte Zusammenhänge zurückführen lässt, sind die Größen der Koeffizienten vollständig unbekannt. Es können damit keine bekannten Literaturwerte für die Zeitkonstanten θ_i , die Farbdichteänderung jedes Effektes $\Delta D^*_{DIS,i}$ oder die Farbdichte der getrockneten Druckfarbe verwendet werden.

Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Versuche zunächst sequenziell approximiert. Das bedeutet, dass das vollständige Messergebnis der Farbdichte über der Trocknungszeit getrennt und stückweise betrachtet wird. Dazu wird zunächst nur der Teil betrachtet, in dem verlässlich ein Abfallen des Messwertes beobachtet. Dieser Teil wird dann mit der separaten Ansatzfunktion 5.9 approximiert, die lediglich aus den Koeffizienten für die Farbdichte der getrockneten Druckfarbe $D^*_{DIS,dry}$ und einem Exponentialfunktionssummand der Ansatzfunktion 5.8 aus Abschnitt 5.6.2 besteht.

$$D^*_{DIS}(t_{D^*DIS}) = D^*_{DIS,dry} + \Delta D^*_{DIS,1} \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_1} t_{D^*DIS}\right)} \quad 5.9$$

Mit Hilfe geschätzter Startwerte können Werte der Koeffizienten aus einer Approximation bestimmt werden. In Abbildung 77 ist ein Beispiel dieser Approximation dargestellt.

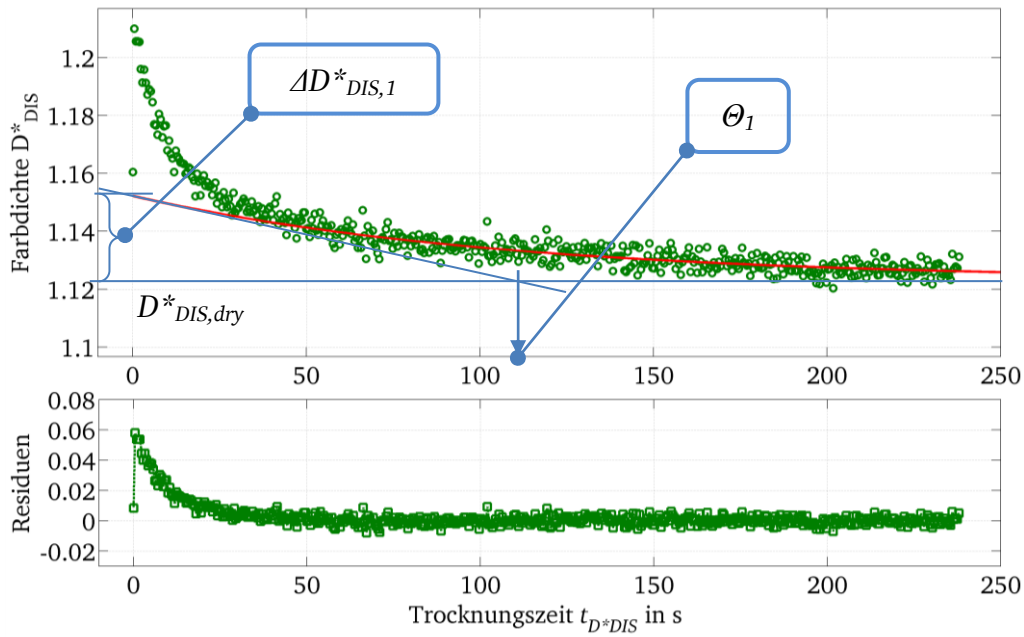


Abbildung 77: Beispiel einer Approximation nach Ansatzfunktion 5.9 für den Bereich der Messung, in dem sicher nur ein fallender Messwert beobachtbar ist. Im unteren Teil sind die Residuen dieser Approximation abgebildet. Sie dienen als Datengrundlage für die weitere Approximation nach Ansatzfunktion 5.10.

Im oberen Teil der Grafik ist die Farbdichte D^*_{DIS} über der Trocknungszeit t_{D^*DIS} aufgetragen. Zudem ist der Verlauf der Ansatzfunktion 5.9 für die berechneten Werte $\Delta D^*_{DIS,1}$ und θ_1 in Rot dargestellt. Außerdem ist der Betrag der Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,1}$ und die zugehörige Zeitkonstante θ_1 in die Abbildung eingetragen. Anhand der Residuen im unteren Teil der Grafik wird deutlich, dass die bestimmten Werte von $\Delta D^*_{DIS,1}$ und θ_1 den Bereich der Trocknungszeit $t_{D^*DIS} > 50$ s sehr gut beschreiben. Der Teil der Residuen r_1 für Trocknungszeiten $t_{D^*DIS} < 50$ s aus dieser Approximation wird danach erneut mit Ansatzfunktion 5.10 approximiert, die aus einem Summanden der Summe an Exponentialfunktionen der Ansatzfunktion aus Abschnitt 5.6.2 besteht.

$$D^*_{DIS}(t_{D^*DIS}) = \Delta D^*_{DIS,i} \cdot e^{-\left(\frac{1}{\theta_i} t_{D^*DIS}\right)} \quad 5.10$$

In Abbildung 78 ist ein Beispiel für das Ergebnis der zweiten Approximation für die Residuen aus der ersten Approximation. Im oberen Teil der Grafik ist in Grün die Farbdichte über

der Trocknungszeit aufgetragen. Der Verlauf der ersten Approximation ist in Rot dargestellt.

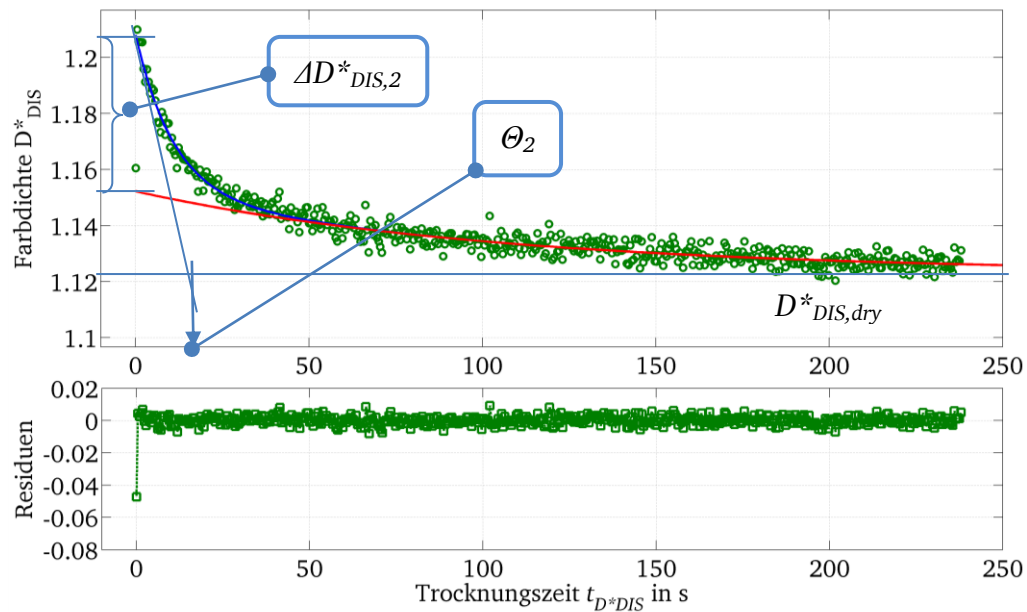


Abbildung 78: Beispiel einer Approximation nach Ansatzfunktion 5.10 für die Residuen der ersten Approximation, die nach Ansatzfunktion 5.9 durchgeführt wurde. Im unteren Teil der Grafik sind die Residuen der Approximation aufgetragen. Sie dienen als Datengrundlage für die dritte Approximation, die ebenfalls nach Ansatzfunktion 5.10 erfolgt.

Der Verlauf der zweiten Approximation für die berechneten Werte $\Delta D^*_{DIS,2}$ und θ_2 in ist in Blau eingetragen. Zusätzlich werden in der Grafik sowohl der Betrag der Änderung der Farbdichte als auch die zugehörige Zeitkonstante grafisch gezeigt.

Im Anschluss werden die Residuen r_2 zwischen dieser zweiten Approximation und den Residuen r_1 der ersten Approximation gebildet. Die daraus entstehende Restabweichung wird erneut mit der Ansatzfunktion 5.10 approximiert und die Residuen r_3 berechnet. In Abbildung 79 wird das Ergebnis der dritten Approximation durch den hellgrünen Verlauf dargestellt.

Stimmt die Annahme aus Abschnitt 5.6.2, dass die Messwertänderung der Farbdichte maßgeblich durch drei Effekte bestimmt wird und damit die Ansatzfunktion aus drei Summanden einer Exponentialfunktion besteht, sollten die Residuen r_3 im unteren Teil der Grafik von Abbildung 79 der Restabwei-

chung bzw. der Streuung des Messgerätes entsprechen. In Abbildung 79 ist zu sehen, dass dies im gezeigten Beispiel der Fall ist.

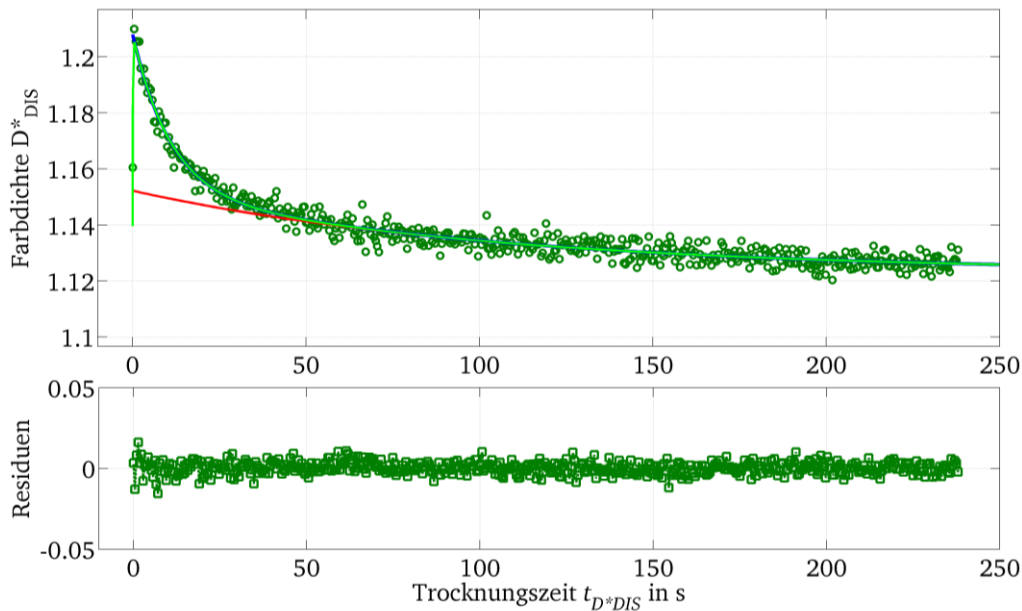


Abbildung 79: Beispiel einer Approximation nach Ansatzfunktion 5.10 für die Residuen der zweiten Approximation. Im unteren Teil der Grafik sind die Residuen der Approximation aufgetragen. Dies ist die Restabweichung nach den sequenziellen Approximationen.

Wichtiges Ziel bei diesem Vorgehen ist, dass sich die gefundenen Werte der einzelnen Zeitkonstanten der drei Summanden deutlich voneinander unterscheiden. Nur so ist sichergestellt, dass jeder der drei Summanden nachvollziehbar einen Effekt auf die Messwertänderung der Farbdichte während der Trocknung beschreibt. Die so gewonnenen Werte für die sieben Koeffizienten können nun als Startwerte für eine Approximation des gesamten Ergebnisses einer Messung der Farbdichte während der Trocknungszeit verwendet werden.

5.6.4 Gewichtungsfunktion für Approximation

Neben den unbekannten Startwerten ist die Gewichtung der Messwerte für eine Approximation der Farbdichte während der Trocknungszeit eine weitere Herausforderung. Wie in Absatz 5.5.4 dargestellt, nimmt die Streuung des aufgenommenen Messwertes während der Trocknungszeit ab. Damit müs-

sen Werte mit einer größeren Streuung für eine Approximation weniger stark gewichtet werden. Dazu wird eine Gewichtungsfunktion $\omega(D_{DIS}^*(t_{D_{DIS}}^*))$ in Abhängigkeit der Standardabweichung σ der Messwerte während der Trocknungszeit eingeführt [117].

$$\omega(D_{DIS}^*(t_{D_{DIS}}^*)) = \frac{1}{(\sigma_{D_{DIS}}(t_{D_{DIS}}^*))^2} \quad 5.11$$

Als Werte der Standardabweichung σ der Messwerte in Abhängigkeit der Trocknungszeit werden die Ergebnisse aus Absatz 5.5.4 verwendet.

5.6.5 Approximationsmethode

Als Approximationsalgorithmus wurde der Trust-Region-Algorithmus mit dem Ziel der Minimierung des gemittelten quadratischen Fehlers verwendet [10]. Dieser Algorithmus ist in der Curve Fitting Toolbox von MATLAB integriert [117]. Sämtliche in Kapitel 6 durchgeführten Berechnungen der Parameter der Modellgleichung 5.8 wurden mit eigenen Skripten auf Basis dieses Algorithmus und des Softwarepaketes MATLAB gelöst.

5.7 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel wurde eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht von einer Druckfarbe, die unter den Bedingungen des Offsetdrucks verdruckt wird, in einem beliebig langen Zeitraum beginnend wenige Millisekunden nach Farbauftrag die Farbdichte zu messen. Damit ist die Grundlage geschaffen worden aus den Daten, die mit dieser Versuchsmethode gewonnen werden, ein empirisches Modell abzuleiten, welches die Änderung der Farbdichte während der Trocknungszeit beschreibt. Neben der mathematischen Modellierung der Messergebnisse, sind dem Modell physikalische Effekte zugrunde gelegt worden, die es somit trotz empirischer Herleitung validieren.

6 Farbdichteänderung durch Trocknung

Mit Hilfe der in Kapitel 5.3 erläuterten Methode und des in Kapitel 5.4 beschriebenen Versuchsstandes sind Messungen der Farbdichte D^*_{DIS} während der Trocknungszeit $t_{D^*_{DIS}}$ durchgeführt worden. Dabei wurde der Einfluss der gedruckten Schichtdicke, der Druckfarbe und des Bedruckstoffes auf die Änderung der Farbdichte während der Trocknung untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden anhand des in Kapitel 5.6 erarbeiteten Modells dargestellt. Dabei wird getrennt nach den Effekten, die den Messwert der Farbdichte beeinflussen, und der jeweilige Einfluss auf die Messwertänderung betrachtet.

6.1 Versuchs- und Modellierungsbedingungen

Als Druckfarbe wurde die Farbserie Novavit F100 des Herstellers Flint Group verwendet [56]. Als rauher, matter Bedruckstoff wurde Maxioffset des Herstellers IGEPAGroup und als glatter, glänzender Bedruckstoff LumiArt des Herstellers StoraEnso (Vertrieb PapierUnion) verwendet [66, 94].

Bei sämtlichen in diesem Kapitel angegebenen Farbdichten, sowie Farbdichteänderungen handelt es sich um nicht korrigierte und nicht kalibrierte Farbdichten D^*_{DIS} . Dies ist damit begründet, dass die in Kapitel 3 hergeleitete Korrektur bzw. die in Kapitel 4 durchgeführte Kalibrierung nur für Druckfarben im getrockneten Zustand gelten. Es ist deshalb nicht möglich die Farbdichten, die im nicht getrockneten Zustand mit dem Druckinspektionssystem gemessen werden, in eine normäquivalente Farbdichte umzurechnen. Erst der berechnete Wert der Farbdichte im getrockneten Zustand darf über die Transformations- oder die Kalibrierfunktion in eine normäquivalente Farbdichte umgerechnet werden.

Weiter sind die durchgeführten Messungen der Farbdichte während der Trocknungszeit immer über einen Trocknungszeitraum von ca. 6 Minuten durchgeführt worden. Dies hat

vor allem Gründe im Zeitaufwand der Versuchsdurchführung. Aus diesen Daten ist eine Modellierung für die Vorhersage der Farbdichte im getrockneten Zustand nur bedingt möglich. Eine Extrapolation des Verhaltens der Druckfarbe über einen Zeitraum von Tagen kann mit diesen Daten nicht erfolgen. Aber es kann eine Farbdichte für den quasistabilen Zustand bestimmt werden, den auch die normgerecht messenden Messgeräte ausgeben.

6.2 Einfluss der Schichtdicke

In diesem Abschnitt soll der Einfluss der gedruckten Schichtdicke auf die Messwertänderung der Farbdichte während der Trocknungszeit t_{D*DIS} ermittelt werden. In Abbildung 80 ist das Ergebnis von Messungen der Farbdichte D_{DIS}^* während der Trocknungszeit für verschiedene Schichtdicken der Druckfarbe dargestellt. Gedruckt wurde die Druckfarbe Gelb auf rauen, matten Bedruckstoff.

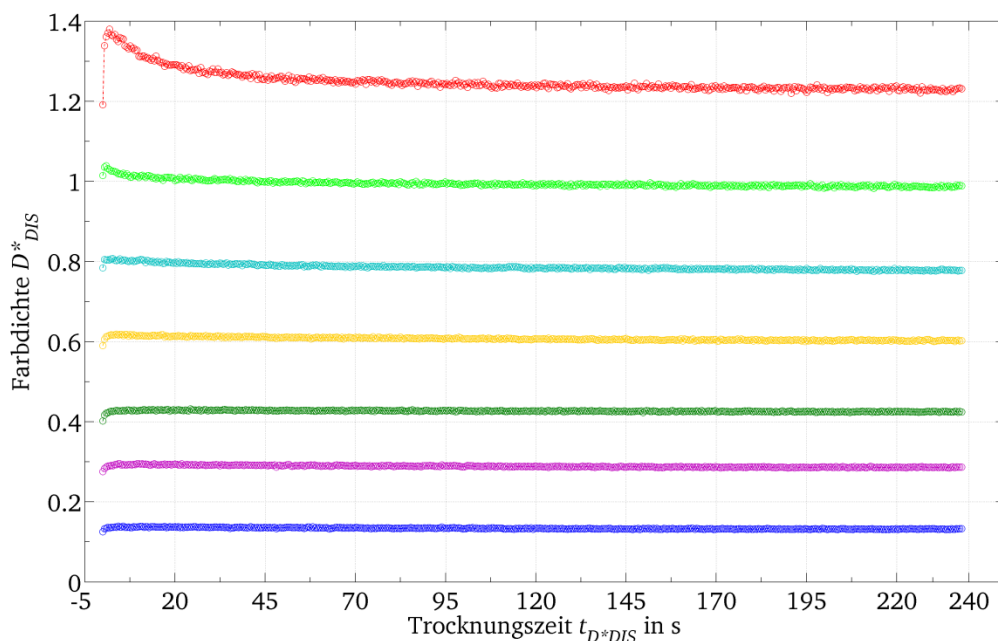


Abbildung 80: Farbdichte D_{DIS}^* über der Trocknungszeit t_{D*DIS} für verschiedene Schichtdicken bzw. Farbdichten der getrockneten Druckfarbe. Es ist der charakteristische Anstieg der Farbdichte und das anschließende Fallen der Farbdichte zu sehen. Für beide Entwicklungen der Farbdichte während der Trocknungszeit, kann eine Variation in der Größe der Farbdichteänderung in Abhängigkeit der gedruckten Schichtdicke abgeleitet werden.

Es ist zu erkennen, dass der Messwert der Farbdichte jeweils der charakteristischen Änderung in Form eines anfänglichen Anstieges und anschließenden Abfalles folgt. Die Ausprägung der Änderung während der Trocknungszeit scheint abhängig von der gedruckten Schichtdicke zu sein.

In den nachfolgenden Auswertungen wird als Maß der gedruckten Farbschichtdicke die Farbdichte der getrockneten Druckfarbe verwendet. Die dargestellten Ergebnisse beruhen auf einem Druck der Druckfarbe Gelb auf rauem, mattem Bedruckstoff.

6.2.1 Kurzzeiteffekt: Oberflächenänderung rau \Rightarrow glatt

Zunächst wird der Einfluss des Effektes für die kleinste bestimmte Zeitkonstante θ_3 dargestellt. Zu der kleinsten bestimmten Zeitkonstante gehört der Effekt des in Abbildung 81 dargestellten Überganges von einer rauhen zu einer glatteren Druckfarbenoberfläche infolge des Verfließens. Durch diesen Übergang zu einer glatten Druckfarbenoberfläche nimmt der in Richtung des Detektors reflektierte Teil der Reflexion ab und damit steigt der Messwert der Farbdichte an (vgl. Abschnitt 5.5.2).



Abbildung 81: Oberfläche der Druckfarbe während der Trocknungszeit t_{D^*DIS} . Übergang von der rauhen zur glatten Oberfläche. Dazu die Entwicklung der Farbdichte D^*_{DIS} infolge des Kurzzeiteffektes.

In Abbildung 82 wird jeweils die bestimmte Zeitkonstante θ_3 und der Betrag der Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,3}$ durch den, zu der Zeitkonstante gehörenden Effekt, über der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe $D^*_{DIS,dry}$ aufgetragen.

Die Zeitkonstanten für diesen Effekt liegen in einem Bereich $0,1\text{s} < \theta_3 < 1\text{s}$. Über der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe ist keine signifikante Änderung der Größe der Zeitkonstante erkennbar.

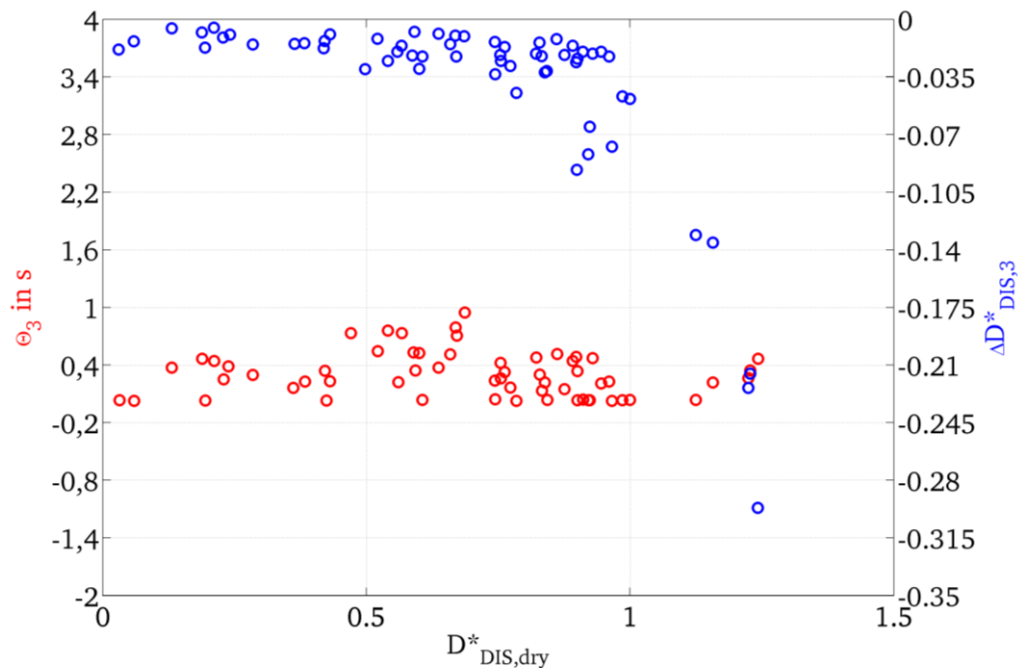


Abbildung 82: Aufgetragen ist in Rot einmal die ermittelte Zeitkonstante θ_3 über der Farbdichte $D^*_{DIS,dry}$ der getrockneten Druckfarbe. Zum anderen ist in Blau die Messwertänderung der Farbdichte durch den zur Zeitkonstante θ_3 gehörenden Effekt über der Farbdichte $D^*_{DIS,dry}$ der getrockneten Druckfarbe aufgetragen.

Durch die positive Definition von ΔD^*_{DIS} in Gleichung 5.8, ist der Betrag der Änderung des Messwertes der Farbdichte negativ. Dieses bedeutet, dass der Messwert der Farbdichte infolge dieses Effektes zunimmt. Die Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,3}$, die aus dem zur ermittelten Zeitkonstante gehörenden Effekt der Oberflächenänderung resultiert, liegt im Bereich $-0,29 < \Delta D^*_{DIS} < -0,002$. Das entspricht einer relativen Änderung von -2% bis -25% bezogen auf die Farbdichte der getrockneten Druckfarbe. Weiter ist die Änderung des Betrages der Farbdichte ΔD^*_{DIS} abhängig von der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe $D^*_{DIS,dry}$. Dabei ist bis zu einer Farbdichte $D^*_{DIS,dry} = 0,8$ keine signifikante Abhängigkeit von ΔD^*_{DIS} zu $D^*_{DIS,dry}$ erkennbar. Für Farbdichten $D^*_{DIS,dry} > 0,8$

steigt der Betrag der Änderung der Farbdichte ΔD^*_{DIS} deutlich an.

Dies ist dadurch zu erklären, dass die Druckfarbenoberfläche mit zunehmender Schichtdicke nach der Farbspaltung zunehmend rauer wird. Ein Effekt, der auch von GLATTER beobachtet wurde und in dieser Untersuchung die Entwicklung von $\Delta D^*_{DIS,3}$ gut erklärt [50]. Der Grund, warum $\Delta D^*_{DIS,3}$ erst ab einem Grenzwert von $D^*_{DIS} = 0,8$ deutlich abfällt, liegt in der Eigenschaft des Bedruckstoffes. Dieser ist rau, so dass erst eine bestimmte Schichtdicke der Druckfarbe erreicht werden muss, bevor die Bedruckstoffoberfläche geschlossen beschichtet wird [46]. Erst ab diesem Zeitpunkt treten die dynamischen Oberflächeneffekte der trocknenden Druckfarbe deutlich in Erscheinung.

6.2.2 Mittelzeiteffekt: Oberflächenänderung glatt \Rightarrow rau

Nun wird der Einfluss des Effektes für die mittlere gefundene Zeitkonstante θ_2 dargestellt. Zu der mittleren gefundenen Zeitkonstante gehört der Effekt des in Abbildung 83 dargestellten Überganges von einer glatten zu einer rauen Druckfarbenoberfläche infolge des Wegschlagens.

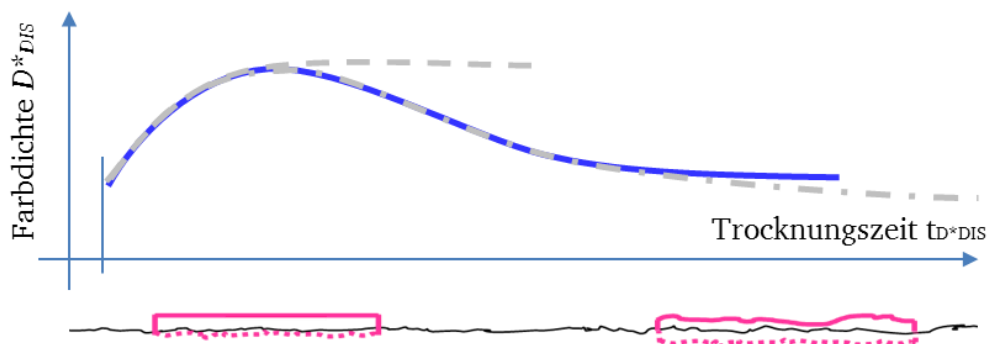


Abbildung 83: Oberfläche der Druckfarbe während der Trocknungszeit t_{D^*DIS} . Übergang von einer glatten zur einer rauen Oberfläche. Dazu die Entwicklung der Farbdichte D^*_{DIS} infolge des Mittelzeiteffektes.

In Abbildung 84 ist einmal die gefundene Zeitkonstante θ_2 für den Mittelzeiteffekt über der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe aufgetragen. Auf der rechten Ordinate ist der An-

teil der Änderung der Farbdichte infolge des Mittelzeiteffektes während der Trocknungszeit aufgetragen.

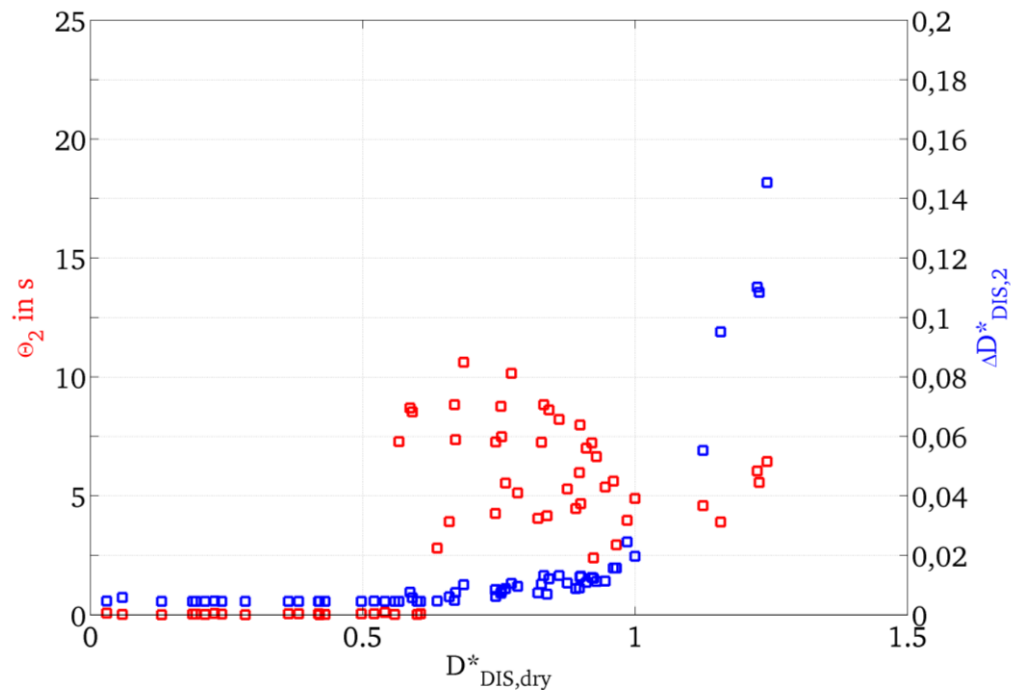


Abbildung 84: Aufgetragen ist in Rot einmal die ermittelte Zeitkonstante θ_2 über der Farbdichte $D^*_{DIS,dry}$ der getrockneten Druckfarbe. Zum anderen ist in Blau die Messwertänderung der Farbdichte durch den zur Zeitkonstante θ_2 gehörenden Effekt über der Farbdichte $D^*_{DIS,dry}$ der getrockneten Druckfarbe aufgetragen.

Die ermittelten Zeitkonstanten θ_2 für diesen Effekt liegen zwischen 0,05s und etwa 10s. Sie sind abhängig von der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe. Für kleine Farbdichten der getrockneten Druckfarbe ist der Wert der Zeitkonstanten sehr klein und er steigt mit zunehmender Schichtdicke an. Diese Größenordnung der Zeitkonstante deckt sich sehr gut mit Aussagen der Literatur über die Dauer des Wegschlagvorganges. Da dieser Vorgang stark abhängig von der gewählten Bedruckstoff- und Druckfarbenkombination ist, werden dort immer Intervalle im Sekundenbereich angegeben [52, 83, 107, 115].

Die ermittelten Werte von $\Delta D^*_{DIS,2}$ steigen mit einer zunehmenden Schichtdicke von 0,005 auf 0,145 an. Auch dieses Verhalten der ermittelten Werte für Zeitkonstanten θ_2 des Mittelzeiteffektes und Änderungen des Messwertes der Farbdich-

te während der Trocknungszeit $\Delta D_{DIS,2}^*$ in Abhängigkeit der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe lässt sich dadurch erklären, dass erst eine bestimmte Schichtdicke erreicht werden muss.

Damit die Änderung der Oberfläche der Druckfarbe von einem glatten zu einem rauen Zustand einen signifikanten Einfluss auf den Messwert der Farbdichte haben kann, muss die Schichtdicke der Druckfarbe ausreichend groß sein. Die Triebkräfte, die das Wegschlagen der Druckfarbe bestimmen, sind jedoch unabhängig von der aufgetragenen Schichtdicke. Sie hängen in erster Näherung nur vom mittleren Porendurchmesser, Viskosität und Oberflächenspannung ab [88, 126]. Trotzdem muss die Schichtdicke so groß sein, dass die Volltonfläche vollständig mit Druckfarbe bedeckt ist und somit keine Erhebungen des Bedruckstoffes freigelegt sind. In Abbildung 85 ist die mikroskopische Aufnahme der Kante eines bedruckten Volltonfeldes auf einem rauen und offenporigen Bedruckstoff gezeigt.

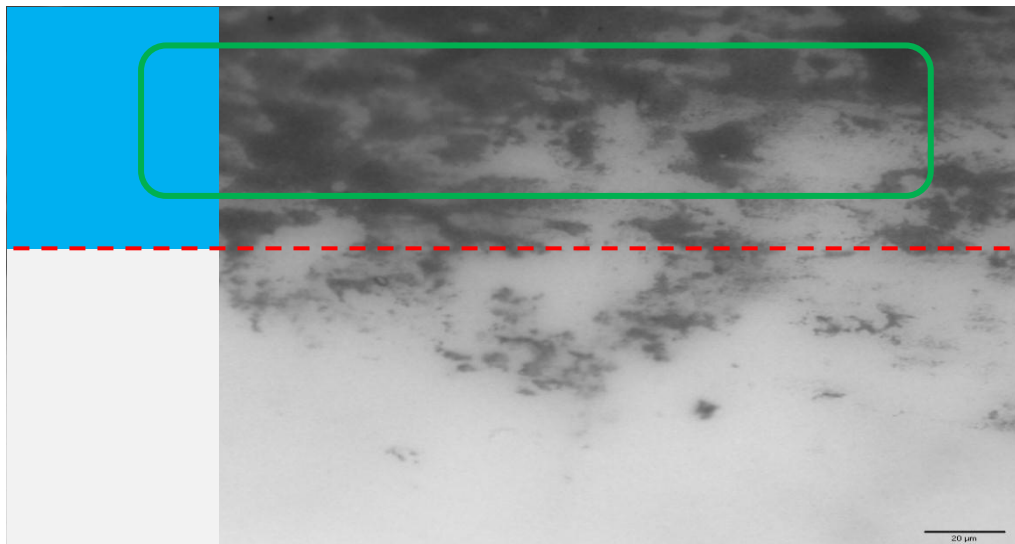


Abbildung 85: Mikroskopische Aufnahme der Kante (dargestellt durch die rote Linie) zwischen einer bedruckten Volltonfläche (oberer Teil der Aufnahme) und dem Bedruckstoff (unten). Links ist zur Verdeutlichung der mit dem Auge wahrgenommene Übergang von der Volltonfläche zum Bedruckstoff dargestellt. Dieser ist rau und besitzt durch seine Offenporigkeit eine hohe Saugfähigkeit bei geringer Trennfähigkeit. Im bedruckten Bereich (grüner Rahmen) sind trotz Druckfarbenauftrages weiterhin unbedruckte Fasern zu erkennen (Erstellt mit: sensofar PLu neox [110]).

Trotz des Druckfarbenauftrages sind unbeschichtete Fasern des Bedruckstoffes im Volltonfeld erkennbar. Ist also die Bedruckstoffoberfläche nicht vollständig mit einem Farbfilm bedeckt, werden eine Änderung der Reflexion an der Druckfarbeneroberfläche und die Reflexion der unbedruckten Stellen des Bedruckstoffes überlagert. Je größer der Anteil unbedeckter Stellen in einer Volltonfläche ist, desto kleiner ist der Anteil der Oberflächenreflexion, die den Messwert der Farbdichte beeinflusst. Ein weiteres Indiz für diese Erklärung ist, dass ab einer Farbdichte $D^*_{DIS,dry} = 0,8$ eine signifikante Änderung des Messwertes der Farbdichte infolge des Mittelzeiteffektes erfolgt. Dies ist die Grenzmenge an Druckfarbe, die benötigt wird um eine geschlossene Schichtdicke auf dem rauen Bedruckstoff zu erzeugen.

Das stark streuende Resultat für die Zeitkonstante des Mittelzeiteffektes (vgl. Abbildung 84) kann damit erklärt werden, dass für Schichtdicken $D^*_{DIS,dry} < 0,8$ der Betrag der Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,2}$ klein ist. Für sehr kleine Eingangswerte kann die Approximation nicht gut konvergieren. Es werden als Ergebnis stark variierende Werte berechnet, die die Bedingung der Summe der kleinsten Fehlerquadrate erfüllen.

6.2.3 Langzeiteffekt: Pigmenttransport

Hier wird der Einfluss des Effektes, welcher der größten gefundenen Zeitkonstanten θ_1 zugeordnet wird, dargestellt. Der dieser Zeitkonstante zugeordnete Effekt, ist in Abbildung 86 skizziert.

Hier ist dargestellt wie Pigmente, durch einen anhaltenden Vorgang des Einziehens der Druckfarbe in den Bedruckstoff eindringen [3, 46, 107].

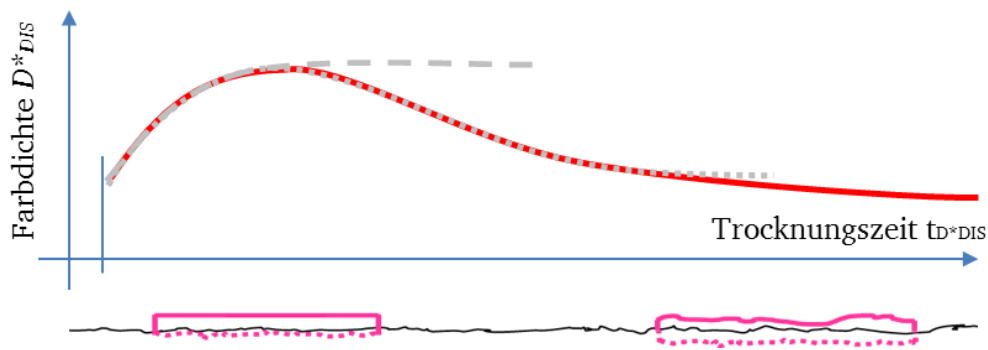


Abbildung 86: Oberfläche der Druckfarbe während der Trocknungszeit t_{D^*DIS} . Reduktion der Schichtdicke und Penetration von Pigmenten in den Bedruckstoff. Dazu die Entwicklung der Farbdichte D^*_{DIS} infolge des Langzeiteffektes.

Zusätzlich kann infolge der sehr lange anhaltenden oxidativen Trocknung der Druckfarbe eine Änderung der Oberfläche der Druckfarbe erfolgen.

In Abbildung 87 ist das Ergebnis der bestimmten Zeitkonstanten θ_1 (in Rot dargestellte Daten) und Farbdichteänderung $\Delta D^*_{DIS,1}$ durch den zu dieser Zeitkonstanten gehörenden Effekt (in Blau dargestellte Daten) in Abhängigkeit von der gedruckten Schichtdicke aufgetragen.

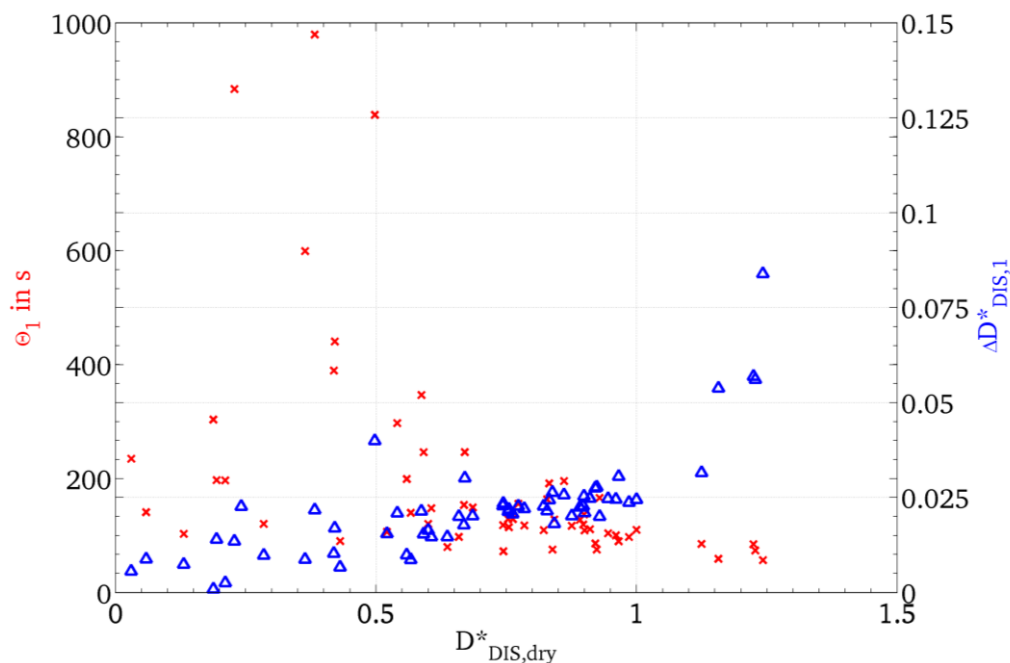


Abbildung 87: Aufgetragen ist in Rot die ermittelte Zeitkonstante θ_1 über $D^*_{DIS,dry}$. Zudem ist in Blau der Betrag der Änderung der Farbdichte ΔD^*_{DIS} durch den θ_1 gehörenden Effekt über der Farbdichte $D^*_{DIS,dry}$ der getrockneten Druckfarbe aufgetragen.

Unter der Bedingung, Werte der Zeitkonstante, die größer als 400s (vgl. Abbildung 87) bestimmt worden sind, als Artefakte misslungener Approximation nicht zu bewerten, ist mit zunehmender Schichtdicke ein Abfallen der Zeitkonstante von ca. 200s auf ca. 100s zu beobachten. Der Grund für die misslungenen Approximationen liegt wie bei der Bestimmung des Mittelzeiteffektes an der geringen Änderung der Farbdichte für kleine Schichtdicken der Druckfarbe. Hier kann die Approximation nicht auf eindeutige Lösungen konvergieren.

Die Änderung der Farbdichte während der Trocknungszeit $\Delta D^*_{DIS,1}$ nimmt mit zunehmender gedruckter Schichtdicke von 0,01 auf 0,085 zu. Das bedeutet eine relative Änderung von 2% bis 7% bezogen auf die Farbdichte der getrockneten Druckfarbe. Diese Zunahme der Änderung der Farbdichte mit steigender Farbdichte der getrockneten Druckfarbe ist im Einklang mit Erläuterungen der Literatur. Je größer das Angebot an Druckfarbe ist, desto länger dauert der Vorgang an, die Bestandteile der Druckfarbe und damit auch Pigmente in den Bedruckstoff zu transportieren [46, 107].

6.2.4 Zusammenfassende Betrachtung

Es konnte gezeigt werden, dass die in der Modellfunktion 5.8 eingesetzten Exponentialfunktionssummanden sowie die hierfür vermuteten Effekte in der Anwendung der Modellfunktion auf die erstellten Messungen wiederzufinden sind. Effekte sind geordnet nach ihrer Zeitkonstante trennbar. In Abbildung 88 sind als ein Ergebnis drei Beispiele einer Messung und der zugehörigen Approximation dargestellt. Dazu ist die Farbdichte D^*_{DIS} für drei verschiedene Schichtdicken der Druckfarbe über der Trocknungszeit t_{D^*DIS} aufgetragen. Zusätzlich ist der Verlauf der gelösten Modellfunktion für den jeweiligen Versuch aufgetragen.

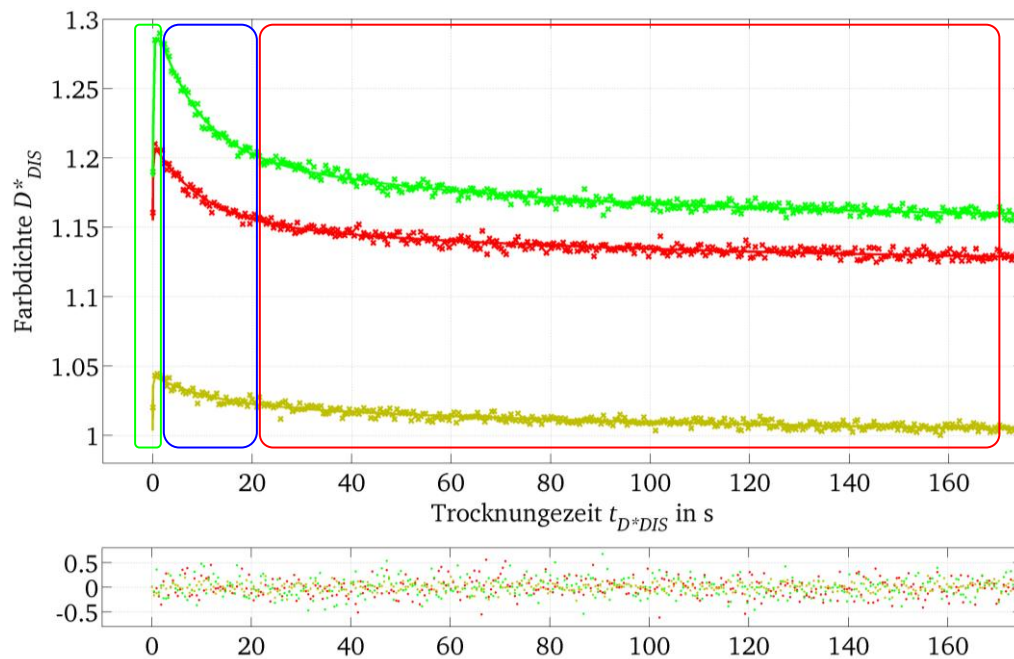


Abbildung 88: Drei Beispiele für die Approximation der Farbdichte während der Trocknung. In den jeweiligen Rahmen herrscht der jeweilige Effekt zur Änderung der Farbdichte vor. Grün = Lang-, Blau = Mittel-, Rot = Langzeiteffekt.

Anhand der im unteren Teil der Grafik eingetragenen Residuen der Approximationen wird deutlich, dass mit den gefundenen Parametern für die Zeitkonstanten und den Beträgen der Farbdichteänderungen eine sehr gute Beschreibung der Farbdichte während der Trocknungszeit möglich ist. Die Rahmen sollen verdeutlichen zu welcher Trocknungszeit welcher der drei festgestellten Effekte den Haupteinfluss auf die Änderung des Messwertes der Farbdichte hat.

An Hand des in Abbildung 88 dargestellten Beispiels wird deutlich, dass die Größe des jeweiligen Effektes und damit der Anteil an der Gesamtänderung der Farbdichte während der Trocknungszeit, mit der angenommenen Modellfunktion quantifizierbar ist. Dabei konnte zudem gezeigt und erklärt werden, dass die einzelnen Effekte abhängig von der gedruckten Schichtdicke sind.

Die Approximation und die damit verbundenen Berechnungen der Zeitkonstanten θ_i und der effektanteiligen Beträge der Farbdichteänderungen $\Delta D^*_{DIS,i}$ ist mit diesem Ansatz für kleine Schichtdicken nicht immer vollständig möglich. Unter kleinen

Schichtdicken werden hier Schichtdicken verstanden, die eine Farbdichte $D^*_{DIS} < 0,5$ haben. Dass die Approximation für diese Schichtdicken nicht gut beschreibbar ist, resultiert daraus, dass für geringe Farbschichtdicken nicht alle im Modell berücksichtigten Effekte auftreten können. Damit eignet sich dieser Ansatz bezüglich einer Vorhersage der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe nur unter Einschränkungen. Ziel war es jedoch zunächst für alle vermuteten Effekte, die einen Einfluss auf die Farbdichteänderung haben, eine generelle Beschreibung zu schaffen.

6.3 Einfluss des Bedruckstoffes

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Bedruckstoffes auf die Änderung der Farbdichte während der Trocknungszeit dargestellt. Dazu werden zuerst Parameter, in denen sich Bedruckstoffe hinsichtlich ihrer Trocknungseigenschaften der Druckfarbe unterscheiden, genannt. Weiter wird an einer Beispielmessung generell die Wirkung unterschiedlicher Bedruckstoffe auf die Farbdichteänderung während der Trocknungszeit gezeigt. Im Anschluss wird die Änderung der Farbdichte, getrennt nach den ermittelten Trocknungseffekten und in Abhängigkeit der gedruckten Schichtdicke, für zwei unterschiedliche Bedruckstoffe dargestellt.

6.3.1 Bedruckstoffeigenschaften

Eine zentrale Bedeutung für die Größenordnung und das Auftreten von Effekten, die die Farbdichte während der Trocknung beeinflussen, ist der Bedruckstoff. Bedruckstoffe sind im Offsetdruck in der Regel Papiere, die in ihrem strukturellen Aufbau porös sind. Der strukturelle Aufbau bestimmt unter anderem die für die Trocknung von Druckfarben relevanten Eigenschaften des Saugvermögens, der Trennwirkung und der Sauggeschwindigkeit [46, 90, 107, 127]. Unter dem Saugvermögen wird die Porengröße bzw. die Anzahl an vorhandenen Poren verstanden. Je größer das freie Volumen im Bedruckstoff ist, desto größer kann das vom Bedruckstoff aufge-

nommene Volumen sein. Die Eigenschaft der Trennwirkung wird durch den kapillaren Aufbau des Bedruckstoffes bestimmt. Mit dieser Größe wird die Fähigkeit des Bedruckstoffes gekennzeichnet, feste von flüssigen Bestandteilen der Druckfarbe zu trennen. Die Sauggeschwindigkeit wird durch den Porenradius, aber auch durch rheologische Parameter der Druckfarbe bestimmt [3, 15, 46, 90, 107, 127].

Die oben genannten Eigenschaften des Bedruckstoffes bestimmen die Größe bzw. das generelle Auftreten der Effekte, die der ersten und zweiten Zeitkonstante zugeordnet werden. Dabei sind das Wegschlagen der Druckfarbe und die Penetration von Pigmenten in den Bedruckstoff zu berücksichtigen. Durch die oben genannten Eigenschaften wird zudem die Struktur der Oberfläche bestimmt. Ein Bedruckstoff, der beispielsweise eine gute Trennwirkung und ein niedriges Saugvermögen hat, ist in der Regel glatt an seiner Oberfläche. Die Struktur der Oberfläche hat wiederum einen Einfluss auf die Farbspaltung [4]. Damit muss auch die Bedruckstoffoberfläche einen Einfluss auf den Kurzzeiteffekt haben.

Es ist jedoch kein Modell bekannt, welches beschreibt, in welcher Größenordnung die drei Effekte einen Einfluss auf die Änderung der Farbdichte haben. Zudem sind die genannten Einflüsse des Bedruckstoffes nicht voneinander getrennt sowie eindeutig messbar. Um den grundsätzlichen Einfluss des Bedruckstoffes zu zeigen, werden in dieser Arbeit zwei deutlich unterschiedliche Bedruckstoffe betrachtet: ein glatter, glänzender Bedruckstoff und ein rauer, matter Bedruckstoff.

6.3.2 Die Wirkung auf die Farbdichteänderung

Der Einfluss des Bedruckstoffes auf die Änderung der Farbdichte während der Trocknungszeit ist in Abbildung 89 dargestellt. Hier ist einmal die Farbdichte der Druckfarbe auf einem rauen, saugstarken und trennschwachen Bedruckstoff sowie einmal die Farbdichte einer Druckfarbe auf einem glatten sowie trennfähigen und wenig saugstarken Bedruckstoff,

über der Trocknungszeit aufgetragen. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Messwert der getrockneten Druckfarbe für beide Proben ungefähr gleich ist.

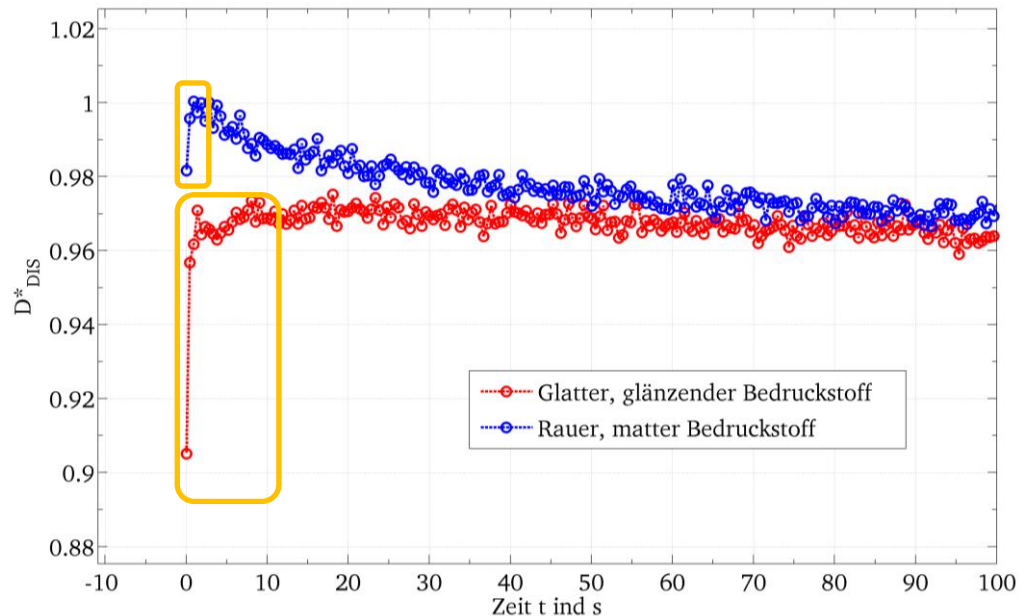


Abbildung 89: Farbdichte D^*_{DIS} über der Trocknungszeit t für zwei verschiedene Bedruckstoffe: glatt, trennstark sowie saugschwach und rau, trennschwach und saugstark.

Es ist zu sehen, dass die anfängliche Änderung (hervorgehoben in den orangenen Rahmen) bei dem glatten Bedruckstoff deutlich größer ist und länger dauert als für den rauen. Sie beträgt für den glatten Bedruckstoff ca. 7% und für den rauen ca. 2% bezogen auf das Maximum des Messwertes der Farbdichte. Des Weiteren vergehen ca. 10s bis zum Wendepunkt der Änderung der Farbdichte für den glatten Bedruckstoff. Für den rauen Bedruckstoff ist bereits nach ca. 2s der Wendepunkt erreicht. Dies liegt daran, dass der Effekt der stark strukturierten Oberfläche infolge der Farbspaltung auf einem glatten Bedruckstoff durch die bessere Benetzung wesentlich stärker auftreten kann. Auf rauen Bedruckstoffen werden hauptsächlich die Vertiefungen im Bedruckstoff gefüllt und es tritt eine nicht so stark strukturierte Oberfläche nach der Farbspaltung auf. Damit ist eine Änderung der Druckfarbenoberfläche von „rau nach glatt“ ebenfalls kleiner [50].

Die anschließende Änderung der Farbdichte ist für den rauen Bedruckstoff deutlich ausgeprägter. Während über der dargestellten Trocknungszeit lediglich eine Änderung der Farbdichte von 2% bezogen auf die Farbdichte nach 100s erfolgt, erfolgt für den rauen Bedruckstoff eine Änderung von 4%. Dabei ist der Gradient der Änderung für den rauen Bedruckstoff deutlich größer. Dieses Verhalten kann über das im Vergleich zum glatten Bedruckstoff höhere Saugvolumen des rauen Bedruckstoffes erklärt werden.

In Abbildung 90 ist ein Versuch dargestellt, in dem die Aufnahmefähigkeit von Wasser nach COBB durchgeführt wurde [15, 25].

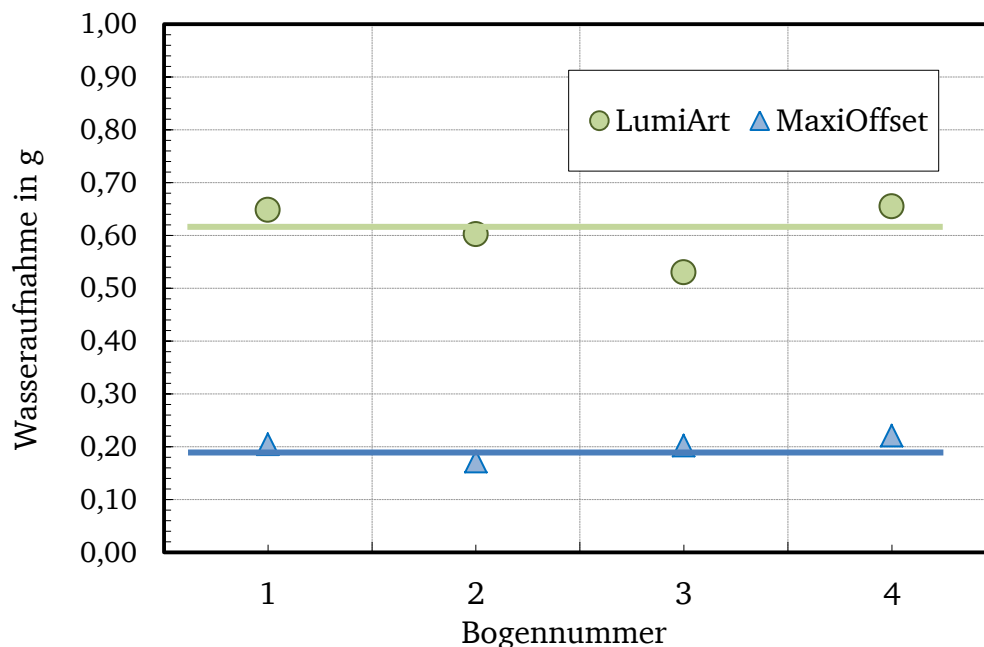


Abbildung 90: Wasseraufnahme nach Cobb als Nachweis für das höhere Saugvermögen des rauen Bedruckstoffes. Aufgetragen ist die Wasseraufnahme in g über vier Proben des gleichen Bedruckstoffes, um einen Mittelwert bilden zu können. Die Wasseraufnahme des rauen Bedruckstoffes ist ca. dreimal so groß, wie die des glatten Bedruckstoffes.

Dabei werden Bedruckstoffproben eine definierte Zeit (60s) flächig mit Wasser benetzt. Durch eine Gewichtsbestimmung vor und nach der Wasserbenetzung, kann der Anteil an aufgenommenem Wasser bestimmt werden. Der raue Bedruckstoff nimmt ca. dreimal so viel Wasser auf wie der glatte Bedruck-

stoff. Damit ist deutlich, dass der raue Bedruckstoff sehr viel mehr Flüssigkeit und damit flüssige Bestandteile der Druckfarbe aufnehmen kann als der glatte Bedruckstoff. Durch die großporige Oberfläche werden zudem Pigmente in den Bedruckstoff transportiert. Der glatte Bedruckstoff hat eine feinporigere Oberfläche und trennt flüssige Bestandteile von den festen Pigmenten. Somit werden auf diesem Bedruckstoff nahezu keine Pigmente in die Bedruckstoffmatrix transportiert. Aus diesem Grund dauert die Farbdichteänderung bei rauen Bedruckstoffen länger und die Änderung ist größer als bei glatten Bedruckstoffen.

Dieses Verhalten kann auch bei einer normgerecht durchgeführten Messung beobachtet werden. In Abbildung 91 ist einmal die normgerecht gemessene Farbdichte einer Druckfarbe (Cyan) auf einem glatten (grüne Auftragung) und einmal auf einem rauen Bedruckstoff (blaue Auftragung) über der Trocknungszeit aufgetragen.

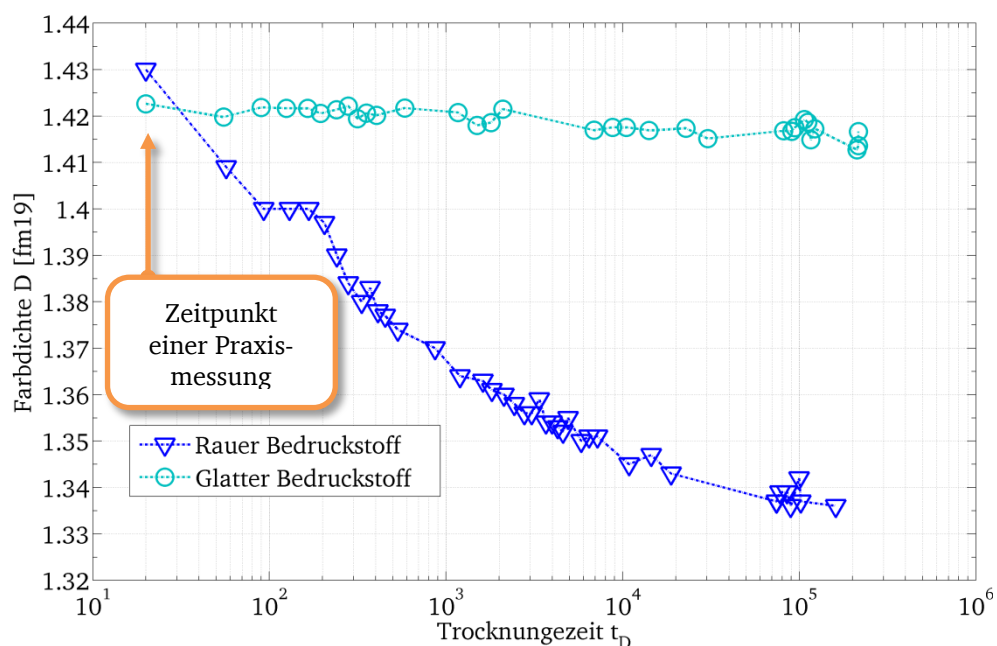


Abbildung 91: Änderung der normgerecht gemessenen Farbdichte D für einen glatten und einen rauen Bedruckstoff. In Rot ist die Farbdichte während der Trocknung für einen rauen und in Blau für einen glatten Bedruckstoff über die Trocknungszeit t_D von zwei Tagen aufgetragen. Für den rauen Bedruckstoff ist eine Änderung der Farbdichte über einen sehr langen Zeitraum feststellbar (gemessen mit fm19 der Grapho Metronic Mess- und Regeltechnik GmbH).

Die Farbdichten beider Proben sind zum Zeitpunkt der ersten Messung ähnlich groß. Die erste Messung wurde in Anlehnung an die Praxis ca. 20s nach Aufdruck der Druckfarbe auf dem Bedruckstoff durchgeführt. Weitere Messungen erfolgten über einen Zeitraum von zwei Tagen. Für den rauen Bedruckstoff ist eine kontinuierliche Änderung der Farbdichte bis zu einer Trocknungszeit von ca. einem Tag (\triangleq ca. 80000s) nachweisbar. Dabei tritt eine Änderung von ca. 7% bezogen auf den ersten Messwert der Farbdichte auf. Auch für den glatten Bedruckstoff tritt eine Änderung der Farbdichte über eine Trocknungszeit von einem Tag auf. Allerdings ist hier die Änderung der Farbdichte kleiner 1% bezogen auf den ersten Messwert nach einer Trocknungszeit von 20s.

Damit wird deutlich, dass auch Messungen, die unter den Bedingungen von DIN 16536 und nach einer Trocknungszeit $t_D \approx 20s$ nach Farbauftrag (angelehnt an die Praxis) durchgeführt werden, während der Trocknungszeit eine Änderung des Messwertes erfahren. Zudem ist die Änderung des Messwertes abhängig vom eingesetzten Bedruckstoff. Da diese Änderung der Farbdichte hauptsächlich aus einem Pigmenttransport in den Bedruckstoff und nicht aus Oberflächenreflexionseffekten resultiert, kann diese Änderung durch den Einsatz eines Polarisationsfilters nicht kompensiert werden.

6.3.3 Kurzzeiteffekt

In Abbildung 92 ist die Änderung der Farbdichte infolge des bestimmten Kurzzeiteffektes über der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe aufgetragen. Dabei wurde der Zusammenhang einmal für einen glatten, saugschwachen sowie trennstarken (2) und einmal für einen rauen, saugstarken sowie trennschwachen Bedruckstoff (1) dargestellt.

Während der Kurzzeiteffekt für den rauen, saugstarken Bedruckstoff erst ab einer bestimmten Schichtdicke signifikant auftritt, nimmt der Effekt für den glatten, saugschwachen Bedruckstoff kontinuierlich zu.

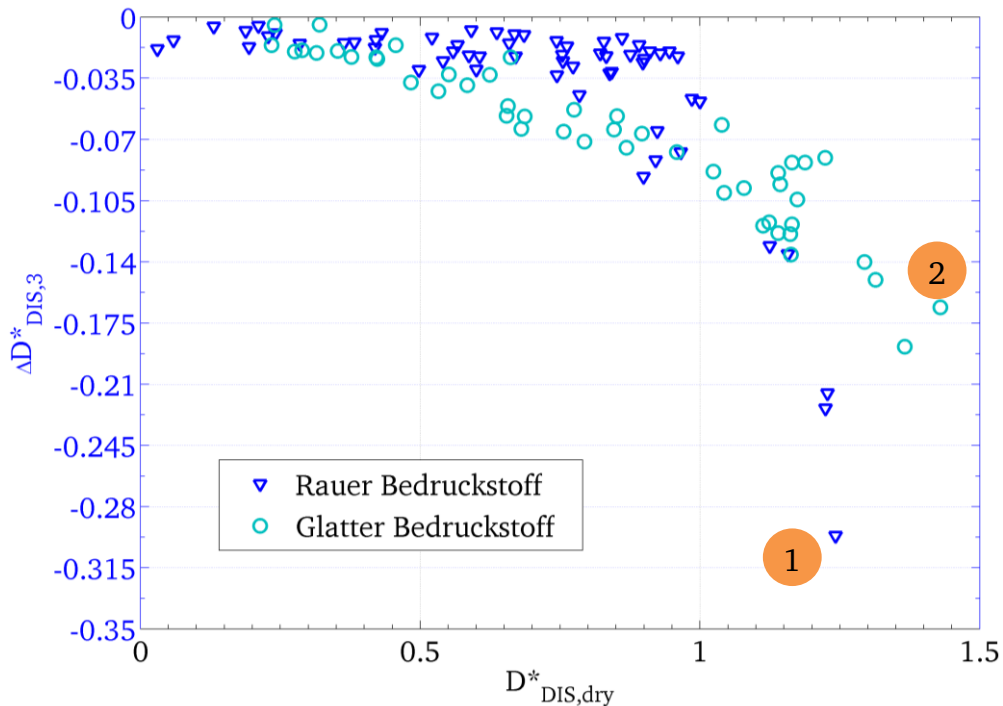


Abbildung 92: Änderung der Farbdichte infolge des Kurzzeiteffektes. Aufgetragen ist die Änderung der Farbdichte über der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe für einen rauen (1) und einen glatten Bedruckstoff (2). Während die Änderung durch den Kurzzeiteffekt bei rauem Bedruckstoff sprunghaft ansteigt, vergrößert sich die Änderung bei glattem Bedruckstoff kontinuierlich.

Das sprungartige Auftreten dieses Effektes für den rauen Bedruckstoff resultiert aus der Mindestmenge an Druckfarbe, die benötigt wird, um die Vertiefungen der rauen Oberfläche zu füllen (vgl. Abschnitt 6.2.1). Bei dem glatten Bedruckstoff müssen diese Vertiefungen nicht erst gefüllt werden, damit die Oberflächenänderung nach der Farbspaltung einen Einfluss auf den Messwert der Farbdichte hat. Aus diesem Grund tritt der Einfluss des Kurzzeiteffektes bei dem glatten Bedruckstoff auch für niedrige Schichtdicken (kleinen Farbdichten der getrockneten Druckfarbe) auf. Mit zunehmender Schichtdicke wird die Struktur nach der Farbspaltung grobstrukturierter und die Rauheit nimmt zu [50]. Damit vergrößern sich die Zeit der Relaxation zu einer glatten Oberfläche sowie die Gesamtänderung der Farbdichte infolge dieses Effektes.

Damit wird deutlich, dass der Betrag der Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,3}$ durch den Kurzzeiteffekt durch Bedruck-

stoffeigenschaften beeinflusst wird. In erster Linie sind hier die topografischen und oberflächenenergetischen Eigenschaften des Bedruckstoffes von Bedeutung. Sie bestimmen durch die Oberflächenstruktur des Bedruckstoffes und ihrer Benetzbarkeit die Oberflächeneigenschaften der Druckfarbe nach dem Auftrag. Da es sich bei dem Kurzzeiteffekt um einen reinen Oberflächeneffekt der Druckfarbe handelt, spielen weitere Bedruckstoffeigenschaften wie Saug- und Trennfähigkeit sowie Sauggeschwindigkeit eine untergeordnete Rolle.

Weiter haben die rheologischen Eigenschaften der Druckfarbe einen Einfluss auf die Benetzung des Bedruckstoffes und den Farbspaltungsprozess bzw. die Druckfarbenoberfläche nach dem Farbspaltungsprozess [50, 82, 127]. Die rheologischen Eigenschaften der Druckfarbe werden durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. Temperatur, Druckspannung, Scherrate und Anteil an emulgiertem Feuchtmittel in der Druckfarbe sind lediglich eine Auswahl dieser Parameter. Viele dieser Parameter sind in einer Druckmaschine nicht messbar. Das sind zum Beispiel Druckspannung, Scherrate und Anteil des emulgierten Feuchtmittels. Andere Parameter wie beispielsweise die Temperatur wurden über sämtliche Versuche konstant gehalten.

Damit gibt es viele Parameter, die einen Einfluss auf den Kurzzeiteffekt haben und die bei sämtlichen dieser Auswertung zugrunde gelegten Versuchen im Rahmen der Anwendung in der Druckmaschine variieren. Da die Einflüsse nicht detektierbar sind, müssen sie als nicht bekannt und somit als statistisch bewertet werden [42, 96]. Dies erfolgt durch die Gewichtungsfunktion aus Abschnitt 5.6.4. Trotz der Kenntnis dieser Unzulänglichkeit in der Messwerterfassung und Korrelation zwischen den Größen der messtechnisch nicht erfassbaren Parameter, ist das Ergebnis der durchgeführten Messungen konsistent und wiederholbar. Andernfalls könnte keine allgemeine Beschreibung der Parameter der Modellgleichung 5.8 für die Farbdichteänderung während der Trocknungszeit aus den Messungen bestimmt werden.

6.3.4 Mittelzeiteffekt

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Mittelzeiteffektes auf die Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,2}$ während der Trocknungszeit und in Abhängigkeit des Bedruckstoffes und der gedruckten Schichtdicke erläutert. In Abbildung 93 ist die Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,2}$ durch den Mittelzeiteffekt über der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe $D^*_{DIS,dry}$ aufgetragen. Dieser Zusammenhang wird einmal für den rauen, saugfähigen und trennschwachen Bedruckstoff 1 und einmal für den glatten, saugschwachen und trennstarken Bedruckstoff 2 dargestellt. Die Farbdichte der getrockneten Druckfarbe dient als Maß für die gedruckte Schichtdicke.

Während sich der Betrag der Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,2}$ für Bedruckstoff 2 in Abhängigkeit der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe kaum ändert, steigt $\Delta D^*_{DIS,2}$ für Bedruckstoff 1 kontinuierlich mit steigendem Gradient für größere Farbdichten der getrockneten Druckfarbe an.

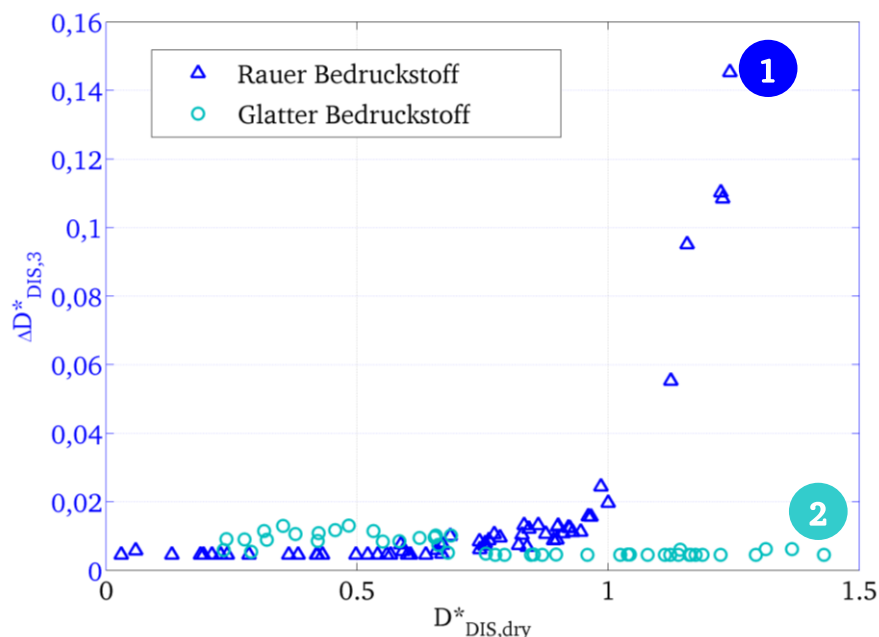


Abbildung 93: Einfluss des Mittelzeiteffektes in Abhängigkeit des Bedruckstoffes. Aufgetragen ist die Änderung der Farbdichte über der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe für zwei Bedruckstoffe. Während der Mittelzeiteffekt für glänzende Bedruckstoffe für keine Schichtdicken der Druckfarbe auftritt, steigt für den rauen Bedruckstoff die Änderung der Farbdichte mit steigender Schichtdicke.

Der Mittelzeiteffekt wird durch das Wegschlagen und die damit verbundene Oberflächenänderung der Druckfarbe bestimmt (vgl. Abschnitt 5.5.2.). Wie bereits in Abschnitt 6.2.2 dargestellt, muss neben der Bedingung des ausreichend dicken Farbfilms für den Bedruckstoff eine zweite Bedingung erfüllt sein. Der Bedruckstoff darf keine große Trennwirkung aufweisen und muss ein großes Saugvolumen haben, um die eindringende Druckfarbe aufnehmen zu können. Im Vergleich zu Bedruckstoff 2 erfüllt Bedruckstoff 1 diese beiden Eigenschaften. Dies führt dazu, dass die Druckfarbe in den Bedruckstoff transportiert wird. Durch die ungleichmäßig über die Oberfläche verteilte Kapillarwirkung des Bedruckstoffes folgt aus diesem dynamischen Vorgang eine strukturierte Oberfläche der Druckfarbe. In Bedruckstoff 2 kann durch das geringe Saugvolumen und die nichtoffenporige Oberfläche die Druckfarbe nicht so schnell und tief eindringen, so dass dieser Effekt keine Auswirkung auf das Oberflächenreflexionsverhalten hat.

Trotz der genannten Eigenschaften des Bedruckstoffes 2 und der berechneten sehr kleinen Farbdichteänderung $\Delta D^*_{DIS,2}$ infolge des Mittelzeiteffektes, kann nicht die Aussage getroffen werden, dass keine Oberflächenänderung der Druckfarbe auftritt. Es ist jedoch keine eindeutige Trennung zwischen Einflüssen des Mittelzeiteffektes und des im folgenden Abschnitt beschriebenen Langzeiteffektes möglich.

6.3.5 Langzeiteffekt

In diesem Abschnitt soll der Einfluss des Bedruckstoffes auf den Langzeiteffekt dargestellt werden (vgl. Abschnitt 6.2.3).

In Abbildung 94 ist die Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,1}$ durch den Langzeiteffekt über der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe $D^*_{DIS,dry}$ für den glatten Bedruckstoff (2) und den rauen Bedruckstoff (1) aufgetragen.

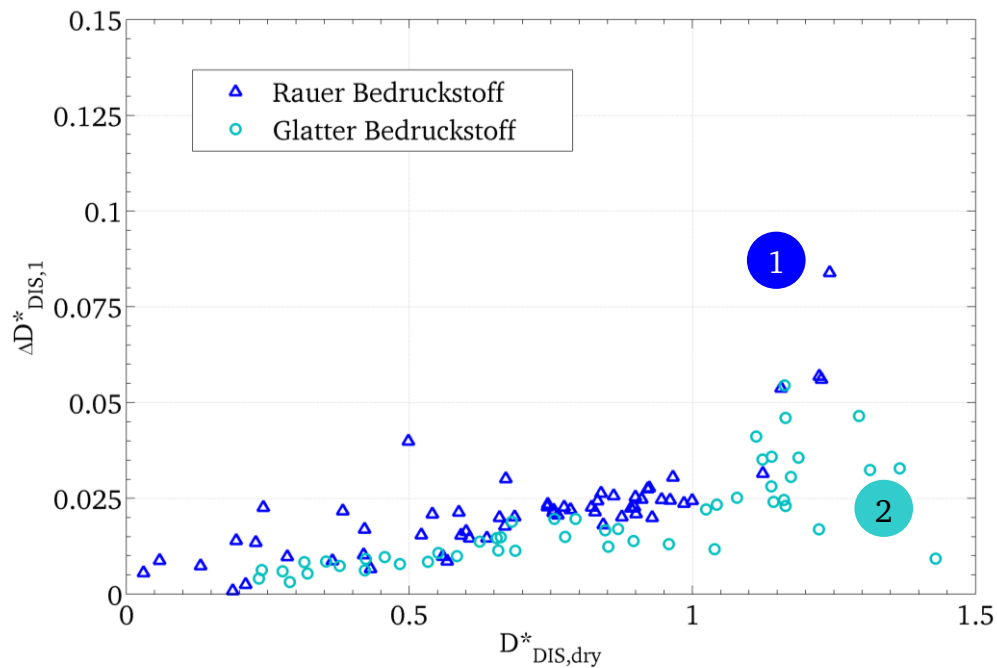


Abbildung 94: Einfluss des Langzeiteffektes in Abhängigkeit des Bedruckstoffes und der gedruckten Schichtdicke. Aufgetragen ist die Änderung der Farbdichte über der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe für zwei Bedruckstoffe.

Für beide Bedruckstoffe nimmt die Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,1}$ infolge des Langzeiteffektes für eine steigende Farbdichte der getrockneten Druckfarbe kontinuierlich zu. Für Bedruckstoff (1) steigt der Gradient ab einer Farbdichte $D^*_{DIS,dry} = 1,1$.

Nach der Interpretation aus Abschnitt 5.5.2 sollte die Messwertänderung der Farbdichte infolge des Langzeiteffektes aus einem Pigmenttransport in den Bedruckstoff resultieren. Bedruckstoff (2) hat jedoch durch die glänzend gestrichene Oberfläche eine starke Trennwirkung. Aus diesem Grund können nur sehr wenige Pigmente in den Bedruckstoff eindringen. Trotzdem ist auch für diesen Bedruckstoff eine signifikante Änderung der Farbdichte durch den Langzeiteffekt feststellbar. Dies resultiert daraus, dass für diesen Bedruckstoff keine Trennung zwischen Effekten, die dem Mittelzeiteffekt oder dem Langzeiteffekt zugeordnet werden können, möglich ist. Für den glänzend gestrichenen Bedruckstoff würde demnach eine Beschreibung über lediglich zwei Zeitkonstanten ausreichen.

6.3.6 Zusammenfassende Betrachtung

In diesem Unterkapitel konnte der eingangs postulierte Einfluss des Bedruckstoffes auf die Messwertänderung der Farbdichte D^*_{DIS} während der Trocknungszeit $t_{D^*_{DIS}}$ gezeigt werden. Insgesamt resultieren für den rauen, offenporigen Bedruckstoff stärkere Änderungen der Farbdichte während der Trocknungszeit als für den glatten Bedruckstoff. Dabei können für den rauen, offenporigen Bedruckstoff drei Effekte, die die Messwertänderung der Farbdichte während der Trocknung bestimmen, separiert werden.

Für den glatten Bedruckstoff konnten nur zwei Zeitkonstanten bestimmt werden. Das bedeutet, dass nur der Kurzzeiteffekt infolge der Farbspaltung von den restlichen, länger andauernden Effekten trennbar ist. Die restlichen, länger andauernden Effekte werden in der dritten Zeitkonstante zusammengefasst.

6.4 Einfluss der Druckfarbe

Nachdem im vorangegangenen Unterkapitel gezeigt wurde, dass der Bedruckstoff einen Einfluss auf den Betrag der Änderung der Farbdichte hat, soll in diesem Unterkapitel gezeigt werden, dass die bisher gezeigten Ergebnisse auf andere Druckfarben, als das gezeigte Gelb (Y) übertragbar sind.

Dazu sind die Berechnungen aus Unterkapitel 6.2 für die Beträge der Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,i}$ sowie der zugehörigen Zeitkonstanten der drei Trocknungseffekte für die drei Druckfarben Cyan, Magenta und Gelb durchgeführt worden. In Abbildung 95 ist analog für die Darstellungen aus Unterkapitel 6.2 für jeden Effekt die Auftragung des Betrages der Änderung der Farbdichte $\Delta D^*_{DIS,i}$ über der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe aufgetragen.

Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse für die drei Druckfarben sehr ähnlich sind. Damit kann gefolgert werden, dass die Druckfarbe keinen signifikanten Einfluss auf den Betrag von $\Delta D^*_{DIS,i}$ hat.

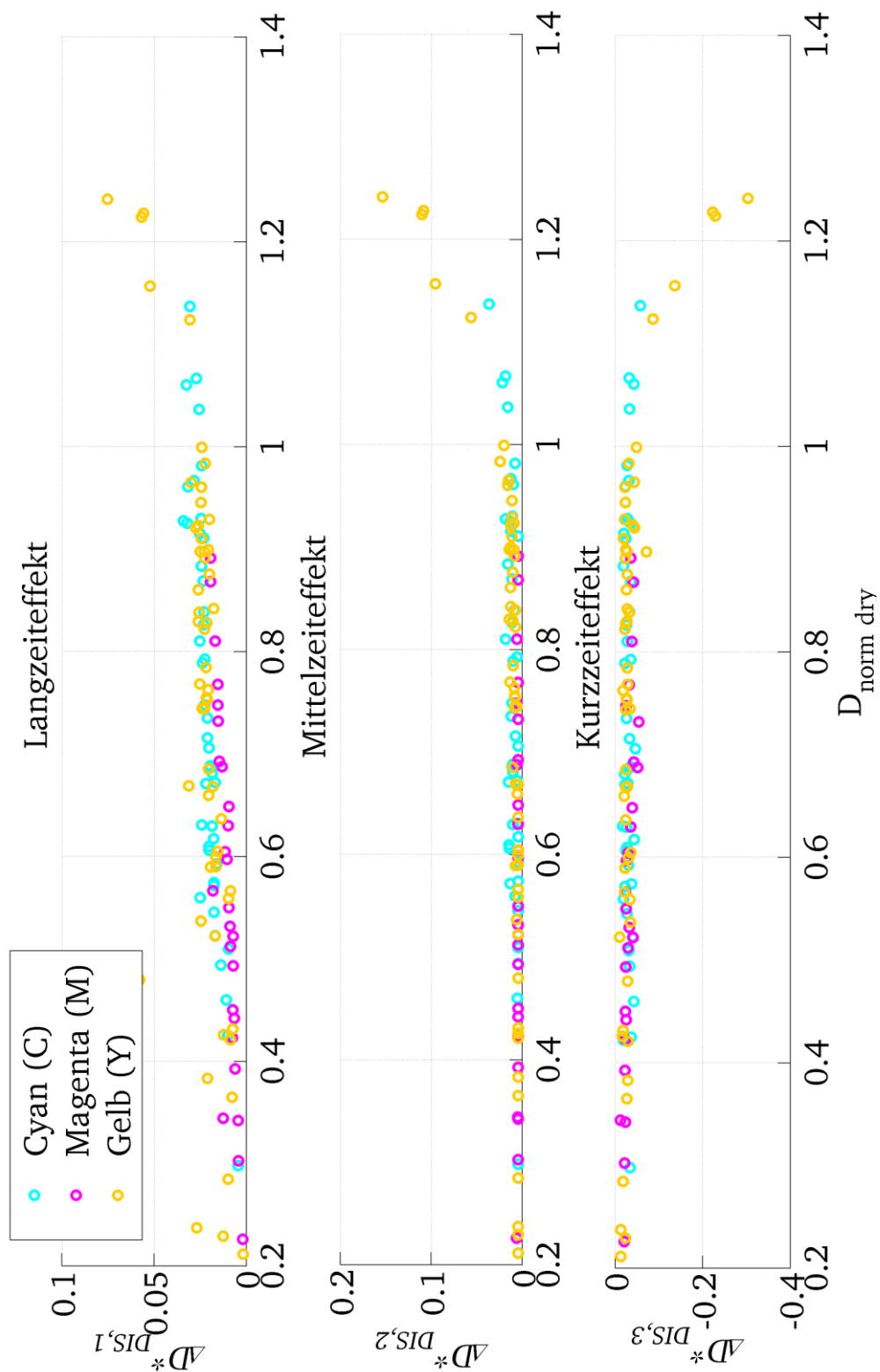


Abbildung 95: Auftragung des jeweiligen Betrages der Änderung der Farbdichte durch den Kurz-, Mittel- und Langzeiteffekt. In jedem der drei Diagramme sind die Werte für $\Delta D^*_{\text{DIS},i}$ für die drei Druckfarben Cyan, Magenta und Gelb dargestellt.

6.5 Zusammenfassung und Fazit

In Kapitel 6 konnten die in der Modellierung in Kapitel 5 berücksichtigten Effekte, die die Änderung der Farbdichte während der Trocknungszeit hervorrufen, aus den erstellten Messungen bestätigt werden. Zudem konnte ein Einfluss der gedruckten Schichtdicke auf den Betrag der Änderung der Farbdichte nachgewiesen werden. Zusammenfassend betrachtet, steigen mit der gedruckten Schichtdicke auch die Beträge der Änderung der Farbdichte.

Weiter konnte gezeigt werden, dass der Bedruckstoff einen signifikanten Einfluss auf die Änderung des Messwertes der Farbdichte während der Trocknungszeit hat. Bei einem glatten Bedruckstoff konnten lediglich zwei Effekte, die die Messwertänderung der Farbdichte hervorrufen, anhand von Zeitkonstanten getrennt werden. Auch die Abhängigkeit von der Schichtdicke der gedruckten Druckfarbe verläuft in einem anderen Zusammenhang, als es für einen rauen, offenporigen Bedruckstoff gezeigt werden konnte.

Einen Einfluss der Druckfarbe auf die Änderung des Messwertes konnte nicht nachgewiesen werden. Bei der Bestimmung der Zeitkonstanten und Beträge der Änderung des Messwertes der Farbdichte in dem Modell aus Kapitel 5 für Cyan, Magenta und Gelb, konnten keine signifikanten Unterschiede in den Lösungen dargestellt werden.

Die Beträge der Messwertänderung der Farbdichte ΔD^*_{DIS} sind zusammenfassend betrachtet abhängig vom verwendeten Bedruckstoff und der gedruckten Schichtdicke.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es zum einen zu zeigen, dass es mit einem Druckinspektionssystem möglich ist, eine normäquivalente Farbdichte zu messen ohne in das Setup des Druckinspektionssystems einzugreifen. Dies konnte am Beispiel des verwendeten Druckinspektionssystems gezeigt werden.

Dazu wurde in Kapitel 3 die Messwerterfassung für eine gerätespezifische Farbdichte der Druckfarben Cyan (C), Magenta (M), Gelb (Y) und Schwarz (K) dargestellt. Aus Detailbetrachtungen der an einer Messung der Farbdichte beteiligten Teilsysteme und ihrer Wirkungsweise auf das Ergebnis der Farbdichte, konnte eine Transformationsfunktion erarbeitet werden, mit der eine Umrechnung in eine normäquivalente Farbdichte möglich ist.

Um ein auf ein Referenzmessgerät rückführbares Ergebnis der normäquivalenten Farbdichte generieren zu können, sind in Kapitel 4 eine Methode sowie ein Versuchsstand dargestellt, mit denen eine Kalibrierung des Druckinspektionssystems auf das Referenzmessgerät möglich ist.

Als zweites Ziel sollte eine Möglichkeit gefunden werden, den Wert der Farbdichte während der Trocknungszeit zu beschreiben. Dazu ist zunächst in Kapitel 5 die Entwicklung einer Messmethode und eines Versuchsstandes dargestellt, mit der die Farbdichte von Druckfarben, die unter realen Bedingungen des Offsetdrucks verdruckt wurden, beginnend wenige Millisekunden nach Farbauftrag während der Trocknungszeit gemessen werden kann.

Aus den Erkenntnissen dieser Messungen wurde in Kapitel 6 mit Hilfe der Ergebnisse der Messungen ein empirisches Modell zur Beschreibung des Wertes der Farbdichte während der Trocknungszeit entwickelt. Während der Entwicklung dieses Modells wurden Effekte isoliert, die einen Einfluss auf die Änderung der Farbdichte während der Trocknungszeit haben und der Einfluss des jeweiligen Effektes auf den Betrag der Änderung der Farbdichte bestimmt. Dabei wurde der Einfluss

verschiedener Bedruckstoffe sowie Druckfarben berücksichtigt.

In dieser Arbeit wurde keine Lösung dargestellt, mit der eine direkte Voraussage der Farbdichte der getrockneten Druckfarbe aus einer Messung der nicht getrockneten Druckfarbe möglich ist. Dies ist jedoch für eine Umsetzung der vorgestellten Methode einer Messung der Farbdichte mit einem Druckinspektionssystem als Produkt notwendig. Da diese Arbeit im Rahmen eines Industrieprojektes entstanden ist und deshalb kein Interesse an einer Veröffentlichung dieser für ein Produkt wichtigen Lösung besteht, wird auf die Darstellung einer Voraussage der Farbdichte der getrockneten Farbe verzichtet.

8 Literaturverzeichnis

1. Rotaprint AG: *Bedienungsanleitung Rotaprint R38a*, 1997.
2. A.HÖPE, HÜNERHOFF, D., AND GRUSEMANN, U.: *New Robot-based Goniometer For Measuring Spectral Diffuse Reflection*. Metrologia, 43, 2006.
3. AHMEDY, M., ET AL.: *A model for ink impression into a porous substrate*. Journal of Physics D: Applied Physics, 30, 1997.
4. ANGELLIER, H., BOUSFIELD, D., AND DIMOTAKIS, M.: *Lithographic Ink Setting On Uncoated Paper*. TAGA Journal, 1, 2005.
5. Artman, R.: *Autotypische Farbmischung*; Available from: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Autotypische_farbmischung.png&filetimestamp=20061023213700#filehistory [17.10.2010].
6. AULL, M.: *Lehr- und Arbeitsbuch Druck*. 7. Auflage ed.: Verl. Beruf und Schule. 432 S., Itzehoe, 2004.
7. Baader-Planetarium-GmbH: *Der Begriff binning oder on-chip binning*; Available from: <http://www.sbig.de/universitaet/glossar-hm/binning.htm> [21.10.2010].
8. BEHLER, H.: *Die Randstruktur von Druckplatten - eine experimentelle Untersuchung der Farbspaltungsströmung* (Dissertation), Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Hochschule Darmstadt, 1993.
9. BELZ, H.: *Messen in Vorstufe und Druck - Farben, Dichten, Tonwerte*. Bundesverband Druck und Medien e.V., 2004.
10. BERGHEN, F.: *CONDOR: A constrained, non-linear, derivative-free parallel optimizer for continuous, high computing load, noisy objective functions*. (Dissertation),

Faculté des Sciences Appliquées, Université Libre de Bruxelles, 2004.

11. BERGMANN AND SCHAEFER: *Lehrbuch der Experimentalphysik Band 3 Optik*, 2004.
12. BLOM, B. E. AND CONNEF, T. J.: *Optical density and ink film thickness - a comparison of models*. TAGA Journal, 1990.
13. BODEN, D. M.: *Narrow-band vs Wide-band Densitometry - An Update*. TAGA Journal, 1989.
14. BORNEMANN, N., SAUER, H.-M., AND DÖRSAM, E.: *Thin Film Behaviour after Ink Transfer in Printing Process*. LOPE-C, 2010.
15. BOS, J. H.: *Das Papierbuch : Handbuch der Papierherstellung*. 2. Aufl.. ed.: ECA Pulp & Paper b.v. 608 S., Houten, 2006.
16. BOUABID, A.: *Numerische und experimentelle Untersuchungen zum mechanischdrucktechnischen Verhalten von Offsetdrucktüchern unter besonderer Berücksichtigung ihrer hyper- und schaumelastischen Eigenschaften* (Dissertation), Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt, 2008.
17. BRÖTZ, H.: *Ein Beitrag zur Farbübertragung in Nassoffsetfarbwerken unter besonderer Berücksichtigung des Feuchtmittels* Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt, 1997.
18. Bundesverband Druck und Medien e.V.: *Prozessstandard Offsetdruck*, 2003.
19. BURKHARDT, A. G.: *Moderne Auflichtdensitometer im Gebrauch*. Deutscher Drucker, 27: p. 10 - 16, 1981.
20. CELIO, T.: *Technische Anforderungen an Farbdichtemessgeräte*. FORGA-Symposium: Densometrie oder Farbmessung in der Druckindustrie, 1988.

21. CELIO, T., MAST, F., AND OTT, H.: *The Use of Polarizing Filters in the Measurement of Optical Reflection Density*. Journal Of Imaging Technology, 17, 1991.
22. Commission Internationale De L'Eclairage: *Polarization: Definitions And Nomenclature, Instrument Polarization CIE N° 59*, 1984.
23. Commission Internationale De L'Eclairage: *Technical Report Colometry CIE 15:2004*, 2004.
24. DIETRICH, E. AND SCHULZE, A.: *Eignungsnachweis von Prüfprozessen : Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld ; mit 47 Tabellen*. 2., aktualisierte und erw. Aufl.. ed.: Hanser. X, 290 S., München {[u.a.]}, 2004.
25. Deutsches Institut für Normung: *Bestimmung des Wasserabsorptionsvermögens - Cobb-Verfahren*, DIN 20535, 1994.
26. Deutsches Institut für Normung: *Drucktechnik: Kontrollfeld, Kontrollbild, Kontrollmarke*, DIN 16527, 1993.
27. Deutsches Institut für Normung: *Durchgang optischer Strahlung durch Medien - optisch klare Stoffe*, DIN 1349, 1972.
28. Deutsches Institut für Normung: *Fachbegriffe im graphischen Gerwerbe Photographie*, 16515-2, 1963.
29. Deutsches Institut für Normung: *Farbmessung*, DIN 5033 - Teil 7, 1982.
30. Deutsches Institut für Normung: *Grundlagen der Messtechnik*, DIN 1319, 1995.
31. Deutsches Institut für Normung: *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1999.
32. Deutsches Institut für Normung: *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*, 1995.

33. Deutsches Institut für Normung: *Photographische Sensitometrie - Bestimmung der optischen Dichte*, DIN 4512 - 10, 1993.
34. Deutsches Institut für Normung: *Prozesskontrolle für die Herstellung von Raster-Farbausügen, Andruck, Prüfdruck und Auflagendruck*, DIN ISO 12647-3, 1998.
35. Deutsches Institut für Normung: *Prüfung von Drucken und Druckfarben der Drucktechnik - Farbdichtemessungen an Drucken* DIN 16536-2 1995.
36. Deutsches Institut für Normung: *Prüfung von Drucken und Druckfarben der Drucktechnik - Farbdichtemessungen an Drucken*, DIN 16536-1, 1997.
37. Deutsches Institut für Normung: *Spektrale Messung und farbmimetrische Berechnung für grafische Objekte*, DIN ISO 13655, 2000.
38. Deutsches Institut für Normung: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik*, DIN 5031-3, 1982.
39. Deutsches Institut für Normung: *Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien*, DIN 5036, 1978.
40. Dörsam, E.: *Farbwiedergabe in den Medien*; Available from: http://www.idd.tu-darmstadt.de/studium_lehre/vorlesungen_2/alle.de.jsp [01.10.2010].
41. DÖRSAM, E.: *Funktionales Drucken - Verfahren und Applikationen*. Treffen des Gesprächskreises Rhein-Neckar (Physikalische Forschung in Industrie und Hochschule), 49, 2009.
42. DÖRSAM, E.: *Praktische Farbmessung*, Vorlesungsskript des Institutes für Druckmaschinen und Druckverfahren der TU Darmstadt, http://www.idd.tu-darmstadt.de/studium_lehre/vorlesungen_2/alle.de.jsp, Darmstadt, 2010.

43. DÖRSAM, E. AND DILFER, S.: *Einsatzmöglichkeiten von Drucktechniken zum Drucken funktionaler Anwendungen*. Nanotechnologie in Kunststoff, 15: p. 106-109, 2009.
44. ENGELMANN, A. AND SCHWEND, K.: *Offsetdruck*, Stuttgart, 1962.
45. EULER, T.: *persönliches Gespräch*, Darmstadt, 2010.
46. FALTER, K.-A.: *Die Abhängigkeit der Verfestigung des Druckfarbenfilms vom Porenvolumen und der Kapillarsaugfähigkeit von Druckpapier*. FOGRA-Forschungsbericht, 1980.
47. FETTER, J.: *Verfahren zur Messung von Farbschichtendicken in Druckwerken mittels ferromagnetischer Resonanz* (Dissertation), Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt, 2009.
48. FOGRA Forschungsgesellschaft Druck e.V.: *Auswirkung von Trocknungseffekten auf die drucktechnischen Steuer- und Messgrößen im Bogenoffsetdruck*, in *Jahresbericht 2009*, München, 2010.
49. GERTHSEN, C. AND MESCHÉDE, D.: *Gerthsen Physik*. 23. ed.: Springer. 1162 S., Berlin, 2006.
50. GLATTER, T. AND BOUSFIELD, D. W.: *Print gloss development on a model substrate*. Tappi Journal, 80,7: p. 125-132, 1997.
51. Grande, B.: *Skript Offsetdruckfarben*; Available from: <http://www.offset-druck-farben.de/download/downlall.htm> [15.08.2010].
52. Grande, B.: *Skript Trocknungsmechanismen in Druckfarben*; Available from: <http://www.offset-druck-farben.de/download/downlall.htm> [03.06.2010].
53. Grapho Metronic Meß- und Regeltechnik GmbH: *Inline Density System - IDS*, <http://www.grapho-metronic.com/gm/de/141.htm>, München, 2008.

54. Grapho Metronic Meß- und Regeltechnik GmbH: *Serviceunterlagen Allgemein fm19*, 2001.
55. Grapho Metronic Meß- und Regeltechnik GmbH: *Technische Information Color Pilot mit fm19-Messkopf*, 2001.
56. Flint Group: *Novavit® F 100 - Product Information*, http://www.flintgrp.com/en/documents/Sheetfed/sf_process_ti_F100_e.pdf, Stuttgart, 2010.
57. Heidelberger Druckmaschinen AG: *Fachwissen Farbe & Qualität*, Heidelberg, 2006.
58. Heidelberger: *Technische Daten Speedmaster CX 102*; Available from: http://www.heidelberg.com/www/html/de/content/products/sheetfed_offset/70x100/speedmaster_cx_102 [10.10.2010].
59. HELBIG, T. AND BOSSE, R.: *Grundlagen der Qualitätsbewertung im Offsetdruck*, Frankfurt am Main, 1993.
60. HENTSCHEL, H.-J.: *Licht und Beleuchtung*. 5. ed.: Hüthing Verlag, Heidelberg, 2002.
61. HOFFMANN, K.: *Die Polarisation bei der Spektralphotometrie von Druckfarben*. *Die Farbe*, 44(1-3): p. 59-67, 1998.
62. HÜBNER, G.: *Ein Beitrag zum Problem der Flüssigkeitsspaltung in der Drucktechnik* (Dissertation), Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, Technische Universität Darmstadt, 1991.
63. HULL, H. H.: *A Reflection Densitometer Head For The Control Of Ink Amounts On Proofs*. *TAGA Journal*, 11, 1959.
64. HUPP, H.: *Qualitäts- und Prozesskontrolle gedruckter Interferenzeffektfarben erster Generation* (Dissertation),

- Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren,
Technische Universität Darmstadt, 2008.
65. HUPP, H. AND DÖRSAM, E.: *Measuring printed special-effect colours - First Experiences with the MultiFX10 spectrophotometer*. International Research Conference IARIGAI, 33rd, 2006.
 66. IGEPAGroup: *MAXI Offset - Produktbeschreibung*;
Available from:
http://www.igepagroup.at/pa_nat_maxi_offset.html
[21.10.2010].
 67. International Organization for Standardization: *Graphic Technology - Color and Transparency Of Ink Sets For Four-Colour-Printing ISO 2846-1*, 1997.
 68. International Organization for Standardization: *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1995.
 69. *Automatische Inspektion für den Verpackungsdruck*,
<http://www.isrvision.com/likecms.php?site=site.html&nav=932&siteid=1154>, Darmstadt, 2010.
 70. JEON, S. J.: *Mechanisms Of Print Gloss Development With Controlled Coating Structure* (Master), University of Maine, 2002: p. 228.
 71. JUDD, D.: *Fresnel Reflection Of Difusely Incident Light*. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 29, 1942.
 72. *Analysten- und Pressekonferenz der Koenig & Bauer AG*,
http://www.kba-print.de/Filestore.aspx/analystenkonferenz_13-11-09-d.pdf?pool=kba&type=file&key=d24c4995-1f31-4dd2-8ae4-8f8039415fd5&lang=de&filetype=pdf&index=true,
Frankfurt, 2009.
 73. KEHREN, K., DÖRSAM, E., AND HUPP, H.: *Printed interference effect colours - process control and quality assurance*. International Research Conference IARIGAI, 36th, 2009.

74. KIPPHAN, H.: *Handbuch der Printmedien*, Heidelberg, 2000.
75. KIRKUP, L. AND FRENKEL, B.: *An introduction to uncertainty in measurement using the GUM*, Cambridge, 2006.
76. KISHNER, D. S. J.: *On-Press Densitometric Analysis Of Printing Variables*. TAGA Journal, 1983.
77. KISHNER, D. S. J.: *A Pulsed-Xenon Densitometer For On-Press Measurements*. TAGA Journal, 1977.
78. Koenig & Bauer AG: *Technische Information QualiTronic Color Control*, 2010.
79. Köth Elektronik: *Bedienungsanleitung Farbdensitometer Chameleon advanced*, Messel, 2010.
80. KOSCHLICK, H.: *Die Farbe*. Drucker ABC. Fachbuchverlag GmbH Leipzig, Leipzig, 1952.
81. KUBELKA, P. AND MUNK, F.: *Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche*. Zeitschrift für technische Physik, 11a: p. S.593 - S.601, 1931.
82. KÜBLER: *Wechselwirkung zwischen Druckfarben und saugfähigen Bedruckstoffen*. Jahrestagung des Vereins Deutscher Druckingenieure VDD e.V., Stuttgart, 1979.
83. LEACH, R. H.: *The Printing ink manual*. 5th ed.: Blueprint, London & New York, 1993.
84. manroland: *Technische Daten manroland 700HiPrint HS*; Available from: <http://www.manroland.com/com/de/bogen-roland-700-hiprint-hs.htm> [08.10.2010].
85. MAST, F. AND CELIO, T.: *Die Polarisatoren in der Remissionsdensitometrie*. FOGRA-IARIGAI-Symposium Densometrie, 1981.

86. MEICHSNER, G., MEZGER, T., AND SCHRÖDER, J.: *Lackeigenschaften messen und steuern*. Vincentz Network, Esslingen, 2003.
87. MENTZER, A.: *Polarization In Graphic Arts - Preliminary Report*. TAGA Journal, 1991.
88. MIDDENDORF, J.: *Zur Beschreibung des kapillaren Flüssigkeitstransportes in Papier* (Dissertation), Graduiertenkolleg Kontinuumsmechanik inelastischer Festkörper, Technische Universität Dresden und Chemnitz, 2000.
89. NIEDERHAUSER, F. W.: *Densitometrie gestern, heute und in der Zukunft*. Deutscher Drucker, 16: p. 32 - 37, 1983.
90. NIESSNER, G.: *Das Wegschlagverhalten von Offsetdruckfarbe und deren Wechselwirkung mit der Bedruckstoff*. FOGRA-Symposium Trocknung von Druckfarben, 1990.
91. NITSCHKE, M.: *Staub aufgewirbelt - das Densitometer-Symposium der IARIGAI*. Der Polygraph, 3, 1980.
92. ORCHARD, S.: *On Surface Levelling In Visous Liquids And Gels*. Journal of applied Science, 11, 1963.
93. OSRAM GmbH: *Licht kann weiß, weiß oder weiß sein*, München, 2010.
94. PapierUnion: *LumiArt - Produktinformation*; Available from:
<http://www.papierunion.de/pau/generator/page=prod1.3/id=25006.jsp> [21.10.2010].
95. PARTHIER, R.: *Messtechnik : Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure*. 4. ed.: Vieweg. 208 S., Wiesbaden, 2008.
96. PAWLOWSKI, K.: *Unsicherheitsanalyse der Messwerterfassung für den Betrieb eines PEM-Brennstoffzellensystems* (Diplomarbeit), Institut für

Thermodynamik und Energietechnik, Universität Paderborn, 2006.

97. PERKAMPUS, H.-H.: *Lexikon Spektroskopie*. VCH. 803 S., Weinheim, 1993.
98. PESCH, B.: *Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM*. Books on Demand. 322 S., Norderstedt, 2003.
99. PRESTON, J. S., PARSONS, D. J., AND GATE, L. F.: *Ink Gloss Development Mechanisms After Printing Part 1 - The Influence of Ink Film Thickness*. TAGA Journal: p. 144 - 156, 2005.
100. Rapitron: *Industrial Video Line-scan CCD Color Cameras*; Available from: <http://www.rapitron.it/images/Xiimus.jpg> [21.10.2010].
101. REED, R. F.: *What the lithographer should know about ink*. LITHOGRAPHIC TECHNICAL FOUNDATION, INC. XIV, 219 S., New York, 1960.
102. RICHTER, M.: *Einführung in die Farbmeterik*. 2. ed.: de Gruyter, Berlin, New York, 1981.
103. RIEDL, R., NEUMANN, D., AND TEUBNER, J.: *Technologie des Offsettdrucks*, Itzehoe, 1989.
104. ROSENBERG, A.: *Einfluss der Farbspaltung auf die Homogenität der Farbschichtdickenverteilung im Offsetdruck unter besonderer Berücksichtigung des Druckes mit frequenzmodulierten Rastern*. FOGRA Mitteilungen, Nr. 157, 1998.
105. RUOKOSUO, N. AND FUCHS, B.: *Correlations between Ink Measuring Methods and Printing Results*. IFRA Special Report, 1992.
106. SAUNDERSON, J. L.: *Calculation of the Color of Pigmented Plastics*. JOSA, 1942.

107. SCHABACKER, V., ET AL.: *Moderne Trocknungsverfahren im Offset*. Formulardruck Symposium, 1982.
108. Schramm, U.: *100% Optische Inspektion mit Farbkamera-Systemen für die Prozess- und Qualitätskontrolle*; Available from: http://www.vdd-net.de/Veranstaltungen/VDD-MGV-2009/Vortraege/PR_Schramm_Druckinspektion_VDD_JT09.pdf [16.10.2010].
109. SCHUNDA, E.: *Densitometrische Kalibrierung eines Kamerasystems* (Bachelor Thesis), TU Darmstadt, Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren, TU Darmstadt, 2009.
110. Sensofar-Tech: *Neox - 3D Optical Profiler*; Available from: http://www.sensofar.com/products/products_neox.html [27.10.2010].
111. SIMOMAA, K. AND KAIVOSOJA, J.: *On-Press Densitometry For Closed-Loop Control Of Offset Inking*. TAGA Journal, 1985.
112. Spiegel, K.: *Die Entwicklung des Bogenoffsetdrucks im Rückblick auf die Drupa 2004*; Available from: http://www.idd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_idd/vddseminare/archiv/VDD-Seminar_04-07-08_Bericht_Spiegel.pdf [10.10.2010].
113. STEMMER IMAGING: *TVI XIIMUS - Familie von leistungsstarken 3-CCD Farbzeilenkameras*, Puchheim, 2007.
114. Techkon GmbH: *Bedienungsanleitung SpectroDens*, <http://www.techkon.de/german/library/download/SD%20Handbuch%202.4%20Web.pdf>, 2010.
115. TESCHENER, H.: *Druck & Medien Technik*. Fachschriften-Verlag GmGH & Co. KG, Fellbach, 2005.
116. TESCHNER, H.: *Offsetdrucktechnik*, 1997.

117. The MathWorks: *Curve Fitting Toolbox 1 - User's Guide*, Natick, 2008.
118. TOLLNAR, D.: *Optical density and ink layer thickness*, in *IGT Werkzaamheden en Publikaties*. 1964, Stichting Instituut voor grafische Techniek tno Amsterdam.
119. TVI VISION: *XIIMUS - When You Need A Fast Colour Camera With Wide Dynamic Range*, Helsinki, 2007.
120. URBAN, P.: *Metamere und multispektrale Methoden zur Reproduktion farbiger Vorlagen*, Hamburg University of Technology, 2005.
121. URBAN, P. AND KRAUSHAAR, A.: *Deriving Optimal Spectra for Standard Offset Primaries*. International Research Conference IARIGAI, 34th: p. 189-196, 2007.
122. URBAN, P., ROSEN, M., AND BERNIS, R.: *A Spatially Adaptive Wiener Filter for Reflectance Estimation*. IS&T/SID Color Imaging Conference: p. 279-284, 2008.
123. URBAN, P., ROSEN, M. R., AND BERNIS, R. S.: *Spectral Image Reconstruction using an Edge Preserving Spatio-Spectral Wiener Estimation*. Journal of the Optical Society of America A, 26: p. 1868-1878, 2009.
124. VÖLZ, H. G.: *Industrial Color Testing*, 2001.
125. WALTHER, T. AND WALTHER, H.: *Was ist Licht? : Von der klassischen Optik zur Quantenoptik*. Beck. 135 S., München, 1999.
126. WASHBURN, E.: *The Dynamics Of Capillar Flow*. Physical Review, 17(3): p. 273 - 283, 1921.
127. WORDEL, H. AND LOIBL, D.: *Wegschlagverhalten der Druckfarbe im Kurzzeitbereich*. FOGRA Forschungsbericht, 2004.
128. WYSZECKI, G. AND STILES, W. S.: *Color science : concepts and methods, quantitative data and formulae*. 2. ed.: Wiley-Interscience. 950 S., New York, 2000.

-
129. x-rite: *Technische Information VipPAQ*, 2008.

Lebenslauf

PERSÖNLICHE DATEN

Name: Kai Pawlowski
Geburtsdatum: 01.03.1978
Geburtsort: Detmold
Familienstand: verheiratet
Staatsangehörigkeit: deutsch

AUSBILDUNG

2001 - 2006 Studium an der Universität Paderborn
Studiengang: Berufsbildung Maschinenbau
Abschluss: Dipl.-Ing. & Erstes Staatsexamen
1988 - 1997 Engelbert-Kämpfer-Gymnasium in Lemgo
1984 - 1988 Grundschule Brake

BERUFSTÄTIGKEIT

2006 - 2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter von
Prof. Dr.-Ing. E. Dörsam, Institut für Druck-
maschinen und Druckverfahren, Technische
Universität Darmstadt
1998 - 2001 Ausbildung zum Industriemechaniker
Maschinen- und Systemtechnik,
Phoenix Contact GmbH & Co. KG

Darmstadt, 30. Oktober 2010

Kai Pawlowski